



TITLE:

連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の長期性状に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

服部, 篤史

CITATION:

服部, 篤史. 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の長期性状に関する研究. 京都大学, 2000, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2000-03-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3167491>

RIGHT:

| |
|------|
| 新制 |
| 工 |
| 1178 |
| |

連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の
長期性状に関する研究

2000 年 2 月

服 部 篤 史

連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の
長期性状に関する研究

2000 年 2 月

服 部 篤 史

目 次

| | |
|---|----|
| 第1章 緒 論..... | 1 |
| 1. 本論文の背景 | 1 |
| 1.1 連続繊維補強材 | 1 |
| 1.2 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用 | 2 |
| 1.3 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用における問題点 | 3 |
| 1.4 コンクリート構造物の性能規定・性能照査と劣化予測 | 5 |
| 2. 本論文の目的 | 6 |
| 3. 本論文の構成 | 7 |
| 参考文献 | 9 |
| 第2章 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の長期性状に関する 既往の研究 | 11 |
| 1. 連続繊維補強材の耐アルカリ性 | 11 |
| 1.1 繊維 | 12 |
| 1.2 樹脂 | 13 |
| 1.3 複合材料と連続繊維補強材 | 16 |
| 1.4 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材 | 19 |
| 2. 連続繊維補強材のコンクリートとの付着とその長期性状 | 20 |
| 2.1 鉄筋・PC鋼材のコンクリートとの付着 | 20 |
| 2.2 連続繊維棒材のコンクリートとの付着 | 28 |
| 2.3 連続繊維シートのコンクリートとの付着 | 31 |
| 参考文献 | 32 |

第3章 連続繊維棒材の耐アルカリ性と引張性状 41

| | |
|---------------------------|----|
| 1. 本章の目的 | 41 |
| 2. 実験概要 | 42 |
| 2.1 浸漬試験 | 42 |
| 2.2 供試体の観察 | 43 |
| 2.3 引張試験 | 45 |
| 2.4 PC はりの曲げ試験 | 45 |
| 3. 浸漬中の状況 | 48 |
| 3.1 浸漬中の荷重 | 48 |
| 3.2 浸漬中の AE | 49 |
| 4. 表面および断面の観察 | 49 |
| 4.1 内部への侵入 | 51 |
| 4.2 表面からの樹脂溶出 | 53 |
| 4.3 アラミド繊維棒材での劣化の進行 | 53 |
| 5. 引張試験 | 58 |
| 5.1 アラミド T | 58 |
| 5.2 炭素およびアラミド K | 62 |
| 6. PC はりの曲げ試験 | 62 |
| 6.1 ひび割れ性状 | 62 |
| 6.2 最大耐力および破壊性状 | 63 |
| 7. 本章のまとめ | 64 |
| 参考文献 | 63 |

第4章 連続繊維棒材の耐アルカリ性とコンクリートとの付着性状 69

| | |
|----------------|----|
| 1. 本章の目的 | 69 |
|----------------|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 2. 実験概要 | 70 |
| 2.1 樹脂および連続繊維棒材の耐アルカリ性試験 | 70 |
| 2.2 アルカリ環境に暴露した連続繊維棒材の片引試験 | 74 |
| 3. 樹脂板の吸水と微小硬度 | 78 |
| 3.1 吸水特性 | 79 |
| 3.2 微小硬度 | 79 |
| 4. 連続繊維棒材の吸水と微小硬度 | 82 |
| 4.1 吸水特性 | 82 |
| 4.2 連続繊維棒材の安定性 | 83 |
| 4.3 微小硬度 | 84 |
| 5. 連続繊維棒材の付着特性 | 85 |
| 5.1 非浸漬の連続繊維棒材 | 85 |
| 5.2 片引試験による連続繊維棒材の付着評価方法 | 91 |
| 5.3 アルカリ溶液に直接浸漬した連続繊維棒材 | 92 |
| 5.4 自然環境および促進環境に暴露した連続繊維棒材 | 95 |
| 6. 本章のまとめ | 96 |
| 参考文献 | 92 |

第5章 連続繊維棒材の引抜き荷重下での付着特性とその長期性状 99

| | |
|-------------------------|-----|
| 1. 本章の目的 | 99 |
| 2. 実験概要 | 99 |
| 2.1 片引試験 | 100 |
| 2.2 付着クリーブ試験 | 102 |
| 3. 片引試験 | 103 |
| 3.1 引抜き荷重—荷重端変位関係 | 103 |
| 3.2 定着長 | 105 |

| | |
|--|-----|
| 3.3 付着応力分布 | 105 |
| 4. 付着クリープ試験 | 108 |
| 4.1 荷重端変位増分の経時変化..... | 108 |
| 4.2 荷重端変位増分の成分..... | 108 |
| 4.3 連続繊維棒材を用いたコンクリート部材における付着クリープの影響..... | 112 |
| 5. 本章のまとめ | 113 |
| 参考文献 | 108 |
| 第6章 連続繊維補強材の定着付着および曲げ付着とその長期性状 | 117 |
| 1. 本章の目的 | 117 |
| 2. 実験概要 | 117 |
| 2.1 定着試験..... | 119 |
| 2.2 曲げ試験..... | 122 |
| 3. 定着試験 | 123 |
| 3.1 導入中の定着性状..... | 123 |
| 3.2 導入後の定着性状..... | 128 |
| 4. 曲げ試験 | 131 |
| 4.1 曲げ載荷時のひび割れ面からの拔出し性状..... | 134 |
| 4.2 曲げ載荷後のひび割れ面からの拔出し性状..... | 134 |
| 5. 本章のまとめ | 136 |
| 参考文献 | 129 |

| | |
|---|-----|
| 第7章 過酷環境下における連続繊維シートによる コンクリート構造物の補修・補強..... | 141 |
| 1. 本章の目的 | 141 |
| 2. 実験概要 | 141 |
| 2.1 連続繊維シートおよび樹脂材料..... | 141 |
| 2.2 連続繊維シート，樹脂およびFRP板の耐酸性 | 143 |
| 2.3 コンクリートの曲げ補強効果とその耐酸性 | 144 |
| 2.4 ヒューム管の外圧補強効果..... | 148 |
| 3. 連続繊維シート，樹脂およびFRP板の耐酸性..... | 150 |
| 3.1 連続繊維シート(CS)..... | 150 |
| 3.2 樹脂..... | 150 |
| 3.3 FRP板 | 151 |
| 4. コンクリートの曲げ補強効果とその耐酸性..... | 153 |
| 4.1 付着試験..... | 153 |
| 4.2 曲げ補強効果..... | 153 |
| 4.3 曲げ補強効果の耐酸性..... | 157 |
| 4.4 連続繊維シートおよび樹脂の引張強度の影響 | 160 |
| 5. ヒューム管の外圧補強効果 | 161 |
| 5.1 内面補強管 | 161 |
| 5.2 外面補強管 | 163 |
| 5.3 ヒューム管の外圧補強効果..... | 163 |
| 6. 本章のまとめ | 164 |
| 参考文献..... | 155 |

| | |
|----------------|-----|
| 第 8 章 結 論..... | 167 |
|----------------|-----|

| | |
|----------|-----|
| 謝 辭..... | 173 |
|----------|-----|

第1章 緒 論

1. 本論文の背景

1.1 連続繊維補強材

連続繊維補強材は、その多くは繊維強化プラスチック(FRP, Fiber Reinforced Plastic)の一種であり、繊維と樹脂の複合材料である。

繊維の建設分野への適用に関しては、古くから、アスベスト繊維、鋼繊維、ガラス繊維などを対象に、数センチメートル程度の長さを有する短繊維として、コンクリート練混ぜ時にランダムに混入して硬化後の補強効果をねらったものを中心に実用化されてきている¹⁾。また、樹脂は、直接的にはポリマーセメントコンクリート、ポリマー含浸コンクリート、レジンコンクリートといったコンクリートへの混入、含浸またはセメント代替材として、あるいはひび割れ注入材、表面被覆材、断面修復材といった補修材料として、コンクリートに深く関わってきた。

FRP は、高強度・高耐久性材料であること、軽量であることなどが要求される産業製品、たとえばゴルフクラブや釣竿などのスポーツ用品や浴槽などをはじめ、自動車や船舶、さらには航空・宇宙産業において半世紀にわたり広く使用されてきた、一般的な材料である²⁾。多くの連続繊維補強材はこの FRP の一種であり、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維などの高性能繊維を、ある程度の長さは連続した状態で用いるコンクリート用補強材の総称である。繊維の高い引張強度を生かすため、連続繊維を一定方向に集束し、一般には樹脂を用いる繊維結合材で集束した複合材料となっている。これらの高強度繊維は、引張強度が鋼材と同程度以上であるため、引張材として用いる鋼材の代替として利用されている。集束形態には、1次元棒材(連続繊維棒材)、2次元・3次元格子材、2次元面材(連続繊維シート)がある。これらのうち、連続繊維棒材は鉄筋や PC 鋼材など棒鋼の代替として利用されるものであり、連続繊維シートは鋼板の代替として利用されるとともに、表面被覆材としての役割も期待して利用されている。

なお、樹脂で収束した連続繊維補強材は、形状は FRP の一種に分類できるが、樹脂を連続繊維で補強したものという意味合いは小さい。連続繊維を用いる点では連続繊維補強材の一種であるが、外管内に配することで集束し、繊維結合材を用いない 1次元材もある。また、コンクリート内での親和性を考慮してセメント系材料を繊維結合材とする 1次元材もあったが、繊維体積比を大きくするのが困難なことなどから現在ではほとんど用いられていない。

1.2 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用

連続繊維補強材を建設の分野において活用しようとする試みは、一つには、半永久的でメンテナンスフリーに近いと考えられてきたコンクリート構造物において近年みられる早期劣化問題への対策に、その端を発している。この早期劣化の原因となっている劣化機構として、塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的コンクリート腐食、疲労やその他のものが挙げられており、各々について、あるいはそれらが複合した場合についての劣化の症状や劣化メカニズムの把握、点検方法、対策方法に関する研究が活発になされてきている。その成果の一部はすでに「コンクリート構造物の維持管理指針(案)」³⁾にまとめられており、近い将来、示方書レベルにまで取り上げられようとしている。これらの劣化のうち、塩害や中性化による鋼材腐食の問題は、コンクリート構造物の耐荷力に大きな影響を与えるとともに、かぶりの剥落を引き起こし、第三者影響度も大きい重大な問題である。これに対し、近年になって、繊維の高強度・高弾性化、プルトルージョン法という成形技術によるクリープ破壊強度の向上により、建設の分野においても実用的なものとなった一方向強化 FRP 材を、建設分野に用いる試みがなされてきた。すなわち、その高い耐久性を生かして、コンクリート構造物に対して鉄筋や PC 鋼材の代替の引張材として利用することが検討されてきた。

一方、上記のように維持管理が必要な既設コンクリート構造物が数多く見られるようになった現在、それらの補修・補強は早急な課題となっている。これらの劣化現象は、コンクリートの施工時から内在する劣化因子による場合と、供用中に外部から浸入した劣化因子による場合がある。これらを概していえば、水の存在あるいはその移動が劣化の主要な原因を担っている。つまり、水自体あるいは水に溶解した物質が劣化因子となっており、コンクリート中の水分制御が、それぞれの劣化を抑制する重要な手法の一つになっている。この観点から、これらの劣化に対する補修工法には、コンクリート表面にライニング層や発水層を形成する表面処理工法が有効である。しかし、補修すなわち劣化の進行を抑制することが主たる目的の表面処理工法に対し、平成 7 年 1 月に勃発した阪神・淡路大震災以降、特に高まっているさまざまな既設コンクリート構造物の耐震補強への要求から、あるいは、下水道施設におけるコンクリートのように、非常に過酷な環境下で劣化の進行が顕著であり耐荷力に問題が生じている構造物への対策として、補強性能を併せ持つ表面処理工法が求められてきた。しかも、近年見られる労働力の不足あるいは少子化による将来的な労働力の不足の問題、さらに、維持管理対策が必要とされているコンクリート構造物の数が増大し迅速な対策が必要となってきたにもかかわらず、大型機械を用いた施工による騒音、粉塵などへの公害対策やエスティックへの配慮が必要となっており、既往の材料、設計、施工、維持管理の手法では対応できない問題が投げかけられている。これに対し、それまで棒状に成形されることが多かった連続繊維補強材を面状に成形し、樹脂を含浸するとともにコンクリートの表面に貼り付ける方法が考案された。すなわち、比強度・比弾性率が大きく体積や質量が小さい

連続繊維補強材によって、施工手順の大幅な変更が可能であり、かつ、繊維の高い引張強度や高い弾性率は耐力の増加や使用状態におけるひび割れに対して抑制効果を有するとともに、繊維と樹脂によって得られる高い耐久性と遮水性により、表面処理工法としての効果を有することを期待した適用方法である。

以上のように、棒状あるいは面状の連続繊維補強材は、コンクリート構造物が有すべき種々の性能を付与するための、材料面からの一つの解決策として検討が進められてきた。

1.3 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用における問題点

以上のように、連続繊維補強材は高耐食性、高強度であるとともに軽量であるという特徴を有しており、それらのうち連続繊維棒材は、鋼材に替わるコンクリート用補強材としての利用が検討されている。現時点では、その高耐食性から、海洋環境にさらされる構造物や凍結防止剤が多量に散布される橋梁などへの適用が注目され、いくつかの実施工例も報告されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。また、高強度であることのみでなく、弾性係数が小さくコンクリートのクリープによるプレストレスの損失が小さいことから、PC 緊張材としての適用が有望視されている。また、既存構造物の耐震補強をはじめとした補強に、同じく連続繊維補強材の一種である連続繊維シートが用いられている。連続繊維シートはコンクリートの表面に貼り付けることができるため、主として既設コンクリート構造物の補強に用いられ、コンクリート内の補強材とともに引張力やせん断力を分担し、補強効果を生じさせることができるものであると同時に、外的劣化因子の侵入を防ぐ、表面保護工に分類される補修効果も有する。連続繊維シートでは、軽量である利点が施工性のよさに顕著に反映されている¹²⁾¹³⁾。また、補強効果を高めるために、連続繊維シートによりコンクリート部材にプレストレスを導入する試み¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾もなされている。これらのほか、連続繊維補強材が持つ鋼材とは異なる特異な性質として磁化しないことを利用した適用事例もある。

しかし、多種多様な適用環境下において長期にわたる供用が必要な土木構造物に適用していくうえで、連続繊維補強材自体が、また、それを用いた部材・構造物が十分に耐久であるのかといった課題は残されたままである。

a) 連続繊維補強材の機械的性質

連続繊維補強材は、炭素、アラミド、ガラス、ビニロンなどの高性能連続繊維に、一般にはエポキシ系、ビニルエステル系の高耐食性樹脂を含浸させ、硬化させて成形したコンクリート補強用の FRP である。これらのうち繊維は、連続繊維補強材の強度の大部分を負担するものである。その直径は $7\sim 15\mu\text{m}$ の範囲であり非常に細いものであるが、比重が $1.3\sim 2.7$ と鋼材に比べて小さいにもかかわらず、引張強度が大きく、比弾性率や比強度でみると鋼材よりも大きい。一方、樹脂としては、繊維の変形に追従しながら繊維の強度を十分に発揮させるため、繊維よりも強度、剛性ともに小さく、高い延性を有する樹脂が用いられている。

しかし、繊維の破壊は非常に脆性的であり、連続繊維補強材の破壊も、同様に、鋼材に比べて非常に脆性的になる⁴⁾。個々の連続繊維補強材を使用した試験から求めるにあたり、連続繊維補強材の種類が多い上に、試験法により得られる結果が異なるため、これまで必要なすべてのデータは得られていなかった。このため、コンクリート構造物の設計に必要な材料強度の特性値の決定に困難が生じている。例えば、連続繊維補強材を用いた引張試験から得られる引張強度は、連続繊維および繊維結合材の種類、形状などによっても異なるが、同一の連続繊維補強材を用いた場合にも、供試体試験部の長さや試験時の定着方法によって異なり、鋼材と比べてばらつきがかなり大きくなることが認められている。これに対し、主な連続繊維補強材について製造方法、機械的性質とその決定方法に関する調査が進められ、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」⁴⁾の中で品質規格や試験法が規定された。現在、各種の連続繊維補強材について、試験法に従ったデータが蓄積されつつある。上記の例の引張強度の設計用値については、試験値のばらつきを考慮し、平均値よりもかなり小さくなるが、従来の材料と同じく、大部分の試験値がその値を下回らないことが保証される値とされている。

b) 連続繊維補強材の耐久性

連続繊維補強材は鋼材のような形式での早期腐食劣化を起こさず、一般的には化学的作用に対する抵抗性が大きいと言ってよい¹⁷⁾。したがって、より耐久性の高いコンクリート構造物を造ることができる可能性があると考えられる。しかし、コンクリート構造物に適用するうえでは、まずは連続繊維補強材自体の耐久性について十分な検討が必要である。連続繊維補強材自体の耐久性に関する項目としては、耐熱性、耐酸・耐アルカリ性、耐薬品性、あるいは耐候性(耐紫外線性)が考えられ、これらの要因が連続繊維補強材の性能に与える影響を明らかにする必要がある。これらの要因のうち、コンクリート用補強材はアルカリ性であるコンクリートと接して用いることが多いため、アルカリ溶液への浸漬を行う促進試験を行い、その後、代表的な性能である引張性状を検討する試験が行われている。また、新設あるいは既存のコンクリート構造物の防食工法である耐食 FRP ライニングは、適用される環境は一般に複合化した腐食環境であるため、耐酸・耐アルカリ性、あるいは種々の耐薬品性が要求され、これらについても検討が進められている¹⁸⁾。しかし、より長期にわたる実環境下での耐久性については十分な研究がなされているとは言えない。

c) 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用

連続繊維補強材は一般的にコストが高い上に、材料特性にもばらつきが大きく、実構造物への適用には慎重にならざるを得ない。また、鋼材と比べて塑性領域が著しく小さく脆性的な破断をするため、従来のコンクリート構造物に用いられた設計思想をそのまま適用できないこと、樹脂で覆われた連続繊維補強材のコンクリートとの付着機構が鋼材とは異なることなどが実構造物への適用にあたっての課題になっている。連続繊維補強材の有する優れた特

性を生かして耐久性の高い構造物を造るためには、これらの課題を克服していく必要があると考えられる。現時点では、柱ほどの靱性は必要とされないプレストレストコンクリート橋梁への適用¹¹⁾をはじめ、非磁性という特長を生かして磁気浮上式鉄道部材や空港・港湾の管制施設などの磁気制御が要求される構造物への適用も検討されつつある⁴⁾。また軽量であることから構造物自体の重量を軽減できるほか、実施工時の取り扱いに重機が不要といった利点から、吊床版橋あるいはグラウンドアンカーへの適用が進んでいる¹¹⁾。さらに、既存のコンクリート構造物に高強度繊維を織物状に加工した連続繊維シートを貼付ける工法¹⁹⁾は、適用事例が大きく増加している。しかし、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の耐久性については、研究データも実構造物による実証データもまだ少ない。建設省による総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術開発」²⁰⁾の中の連続繊維補強コンクリート利用技術に関する研究では、長期性状に関する項目の中で、梁の曲げ試験による耐久性評価、付着試験による耐久性評価あるいは長繊維補強コンクリート梁と PC 梁の長期たわみ性状が報告されるなど、以前から耐久性に関するデータが徐々に蓄積されているが、長期にわたる供用を念頭においた合理的な設計法を確立するには至っていないのが現状である。

1.4 コンクリート構造物の性能規定・性能照査と劣化予測

コンクリート構造物の設計は、要求する性能を規定しそれを照査する方式の基準、すなわち性能照査型基準に従うように移行しようとしている²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾。性能照査型基準の基本的な構成は、一例としてコンクリート標準示方書 耐震設計編²⁵⁾を取り上げると、以下の 3 つの項目である。

(1) 作用を列挙(規定)し、その水準を数値化(算定可能化)する

例: L1 地震動, L2 地震動

(2) 要求する性能を列挙(規定)し、その水準を数値化(算定可能化)する

例: 耐震性能 1, 耐震性能 2, 耐震性能 3

(3) (1)と(2)の組合せを選択(規定)し、作用のもとで、要求する性能が満足されることを確かめる(照査する)

例: L1 地震動のもとで、耐震性能 1 が満足

このように、性能照査型基準では、作用の種類を列挙し、それに対して要求する性能を列挙するとともに、それらをどのように算定して数値化するのかを明らかにする必要がある。さらに、単に売買としての意味だけでなく人間や自然環境への影響をも取り入れたライフサイクルコストを考慮してコンクリート構造物の合理的な設計を行うためには、作用や性能を時間の関数として表現し、供用中のあらゆる時点において照査を行えるようにする必要がある。

る。すなわち、コンクリート構造物あるいはその構成材料では、経時的に変化するある作用のもとで、横軸に時間をとった場合には一般に右下がりの曲線となる、ある保有性能の劣化予測曲線が得られていることが理想的である。

連続繊維補強材については、鋼材のような形式の早期腐食を示さず、耐久的であるとされているものの、一方で歴史が浅く、50年後や100年後の性能は不明瞭であり、保有性能劣化予測曲線は現段階では明らかにされていない。ただし、これは連続繊維補強材に限ったことではなく、コンクリートそのものの保有性能劣化予測曲線さえ、完全なものが得られているとは言えない。このような場合の照査は、促進試験や暴露試験、あるいは実地調査などにより得られたある程度の精度の保有性能劣化予測曲線をもとに、安全率を適切に設定して行ってきたのであるし、今後もしばらくは多くの局面でこの方法が用いられていくと考えられる。しかし、設計・施工から維持管理におよぶライフサイクルコストを念頭においたコンクリート構造物のシナリオをより合理的に形成するためには、供用開始から終了までの保有性能劣化予測曲線を明確に与える必要がある。また、それによって、連続繊維補強材が従来の鋼材と比較してどのような利点を有するかがより具体的になる。

2. 本論文の目的

連続繊維補強材は、その物理的・機械的性質が鋼材に比べて同等以上であることに加え、構成材料である繊維、樹脂ともに、またそれらを複合したFRPとしても、鋼材の腐食に比べて、一般環境はもちろんさまざまな苛酷環境下で比較的高い耐久性を有する。このため、新設・既設コンクリート構造物の耐久性向上に大きく寄与すると期待されるが、適用にあたっての問題点もいくつか挙げられる。それらは、大きく分けると

- (1) 連続繊維補強材自身の物理的・機械的性質に関わる問題
- (2) 連続繊維補強材のコンクリートとの付着に関わる問題

の2点である。(2)は、連続繊維補強材をコンクリートと複合させる段階で考慮すべき問題なので、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の性質に関わる問題といってもよい。これらは、製造初期においてのみでなく、供用中にどのように変化するかを対象とする長期的な問題として取り扱う必要がある。初期の問題については、数多くの研究が行われており、一定の解答が得られている項目もある。しかし、長期的な問題については、いくつかの実証実験が行われてきているもののそのほとんどが未解決のままであると言ってよい。

本論文では、以上の状況に対して、連続繊維補強材および連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物への種々の要求性能が、種々の作用のもとで、どのような保有性能劣化曲線を

示すのかに関する基礎的な研究を行うことにした。すなわち、上記の(1)、(2)に関わる長期的な問題に対し、コンクリートに接して用いる場合に検討が必要なアルカリの作用下における、連続繊維補強材自身の物理的・機械的性質および連続繊維補強材のコンクリートとの付着の長期性状の検討、また、使用状態で発生する付着応力の作用下における、連続繊維補強材のコンクリートとの付着の長期性状の検討、さらに、コンクリート構造物が曝される代表的な苛酷環境である下水道環境において検討が必要な酸の作用下における、連続繊維補強材自身の物理的・機械的性質および連続繊維補強材を適用したコンクリート部材の長期耐荷性状の検討を行うこととした。得られた結果から、連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の長期にわたる性状を明らかにし、コンクリート構造物の合理的なシナリオ形成への一助となることを目的とした。

3. 本論文の構成

本論文は、連続繊維補強材をコンクリート構造物に適用するにあたり、供用中の信頼性を確保するため明らかにする必要がある、種々の環境下での連続繊維補強材の物理的・機械的性質の長期性状に関する一連の研究をまとめたものである。緒論、従来の研究および緒論を含めて8つの章から構成した。

以下に、各章の概要を述べる。

「第2章 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の長期性状に関する既往の研究」では、以下の各章に関連し、繊維、樹脂およびFRPとしての連続繊維補強材の耐アルカリ性、連続繊維補強材の引張特性、付着特性とその長期性状、連続繊維補強材のコンクリートとの付着・定着特性とその長期性状に関する既往の研究を取りまとめた。

「第3章 連続繊維棒材の耐アルカリ性と引張性状」では、連続繊維棒材を対象とした。コンクリート中における連続繊維棒材の引張特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、コンクリート中への埋設を考慮して、主としてアルカリ環境を取り上げた。コンクリート中を模擬したアルカリ溶液中に、高温・引張応力の存在下で連続繊維棒材を浸漬する促進試験を行い、巨視的・微視的な手法で表面や断面の変状を観察するとともに、引張強度、弾性係数、伸びやリラクセーションといった引張特性への影響を明らかにした。さらに、浸漬後の連続繊維棒材を用いたプレストレストコンクリート部材を作成し、その曲げ性状の変化から、コンクリートとの付着特性への影響を含めて長期性状を評価した。

「第4章 連続繊維棒材の耐アルカリ性とコンクリートとの付着性状」では、第3章と同じく連続繊維棒材を対象とした。第3章の結果を受けて行った連続繊維棒材の付着特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、コンクリート中への埋設を考慮し

て、主としてアルカリ環境を取り上げた。第 3 章と同様の促進試験を用い、コンクリートとの付着に与える影響が大きいと考えられる、連続繊維棒材を構成する樹脂に着目した検討を行った。樹脂や連続繊維自身に対する各種の分析に加え、片引き試験により付着特性の長期性状を評価した。

「第 5 章 連続繊維棒材の引抜き荷重下での付着特性とその長期性状」では、第 3 章、第 4 章と同じく連続繊維棒材を対象とした。第 4 章と同じく連続繊維棒材の付着特性の長期性状に関する研究であるが、影響を与える要因としては、主として、ひび割れ近傍における連続繊維棒材への引抜き力の発生を考慮して、供用中にわたり持続的に作用する付着応力の作用を取り上げた。片引きによる引抜き試験を行い、付着応力分布の定量化を行うとともに、持続付着応力を片引きで与える付着クリープ試験を行い、その長期性状を評価した。

「第 6 章 連続繊維補強材の定着付着および曲げ付着とその長期性状」では、連続繊維棒材と連続繊維シートを対象とした。第 5 章と同様に、影響を与える要因としては、供用中にわたり持続的に作用する付着応力の作用を取り上げているが、第 5 章が曲げ付着を模擬した引抜きによる付着特性の検討であるのに対し、プレテンション PC 部材を用い、その緊張材として用いる場合の定着付着特性と、曲げ荷重下での曲げ付着特性の長期性状に関する検討を行った。これらの付着の定量化を行うとともに、定着後の挙動あるいは持続曲げ荷重に対する挙動により、それらの長期性状を評価した。

「第 7 章 過酷環境下における連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強」では、連続繊維シートを対象とした。連続繊維シート自身の引張特性の長期性状、および、連続繊維シートで補強した曲げ部材の耐荷特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、代表的な苛酷環境である下水道施設のコンクリートへの適用を考慮して、主として酸を取り上げた。連続繊維シート、樹脂およびそれらを用いて作成した FRP 板を酸性溶液中に常温で浸漬する促進試験を行い、引張強度、弾性係数、伸びやリラクセーションといった引張性状への影響を明らかにした。さらに、連続繊維シートを用いて曲げ補強した供試体に対して同様の浸漬による促進試験を行い、耐荷性状の変化から、コンクリートとの付着性状への影響を含めたかたちで長期性状を評価した。加えて、連続繊維シートの下水道施設への適用例として遠心力鉄筋コンクリート管(ヒューム管)を取り上げ、連続繊維シートによる補強効果を検討した。

「第 8 章 結論」では、各章で得られた結論を総括した。

参考文献

- 1) 真嶋 光保, 幸左 覧二, 大野 定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, pp.146-151, 1994.5.
- 2) 例えば, 松井 醇一: 複合材料講座, 航空ジャーナル, 1987.2.
- 3) 土木学会: コンクリート構造物の維持管理指針(案), コンクリートライブラリー81, 1995.10.
- 4) 土木学会: 連続繊維棒材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー72, 1992.4.
- 5) 平賀 寿雄: 『なぜ FRP を使うか』コンクリート補強用格子状複合材料, 強化プラスチック, Vol.34, No.6, pp.207-215, 1988.6.
- 6) 日本建築学会 連続繊維複合材料研究委員会: 新補強材のコンクリート構造物への利用の現状と問題, 1989.3.
- 7) 小林 一輔: 新素材とコンクリート, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.17-28, 1990.8.
- 8) 六郷 恵哲, 真嶋 光保: コンクリート構造物への新しい繊維系補強材の利用, 材料, Vol.41, No.471, 1992.12.
- 9) 土木学会 関西支部: 連続繊維補強材の土木構造物への適用に関する研究, 平成 6 年度共同研究グループ報告書, 1995.3.
- 10) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー88, 1996.9.
- 11) 日本コンクリート工学協会 北海道支部: 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, 1996.11.
- 12) (財)鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱耐震補強工法設計・施工指針, 1996.7.
- 13) (財)鉄道総合技術研究所: アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱耐震補強工法設計・施工指針, 1996.11.
- 14) 甄 暁青, 佐伯 昇, 志村 和紀, 秦 滋康: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 桁の耐力, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp.934-935, 1996.9.
- 15) 出雲 健司, 甄 暁青, 志村 和紀, 佐伯 昇: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 部材の曲げ・せん断補強効果, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.141-146, 1996.11.
- 16) 出雲 健司, 浅水 俊博, 佐伯 昇, 志村 和紀: テンションシートを用いた PRC 部材

- のせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1557-1562, 1997.
- 17) Hull, D.(宮入裕夫, 池上浩三, 金原勲訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
 - 18) 浦上 良樹, 高島 昭治郎, 石井 邦男: FRP ライニングの耐酸耐アルカリ試験とその評価について, 材料, Vol. 39, No. 438, pp.277-282, 1990.3.
 - 19) FORCA トウシート技術資料, 東燃株式会社.
 - 20) 建設事業への新素材・新材料利用技術開発.
 - 21) 特集 仕様規定から性能規定へ, コンクリート工学, Vol.35, No.11, 1997.11.
 - 22) 特集 コンクリート構造物のリハビリテーション, コンクリート工学, Vol.36, No.7, 1998.7.
 - 23) コンクリート構造物の構造・耐久性設計境界問題研究委員会 報告書, JCI, 1998.
 - 24) よりよいコンクリートを造るには一性能規定と生コンの品質保証一, コンクリート工学年次大会・生コンセミナー資料, 1998.
 - 25) 土木学会: 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 耐震設計編, 1998.

第2章 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の 長期性状に関する既往の研究

1. 連続繊維補強材の耐アルカリ性

連続繊維補強材は一般には鋼材に見られるような腐食はしないものの、これらを構成する繊維と樹脂は高分子材料であり、経年的に何らかの劣化をすることは避けられない。高分子材料、特にプラスチックの化学的劣化としては、酸やアルカリによるエステルの加水分解反応が代表的なものとして知られている。これ以外にも Fig. 2.1²⁾に示すような化学的劣化があり、その結果、外観、物理的性質あるいは機械的性質が変化する。

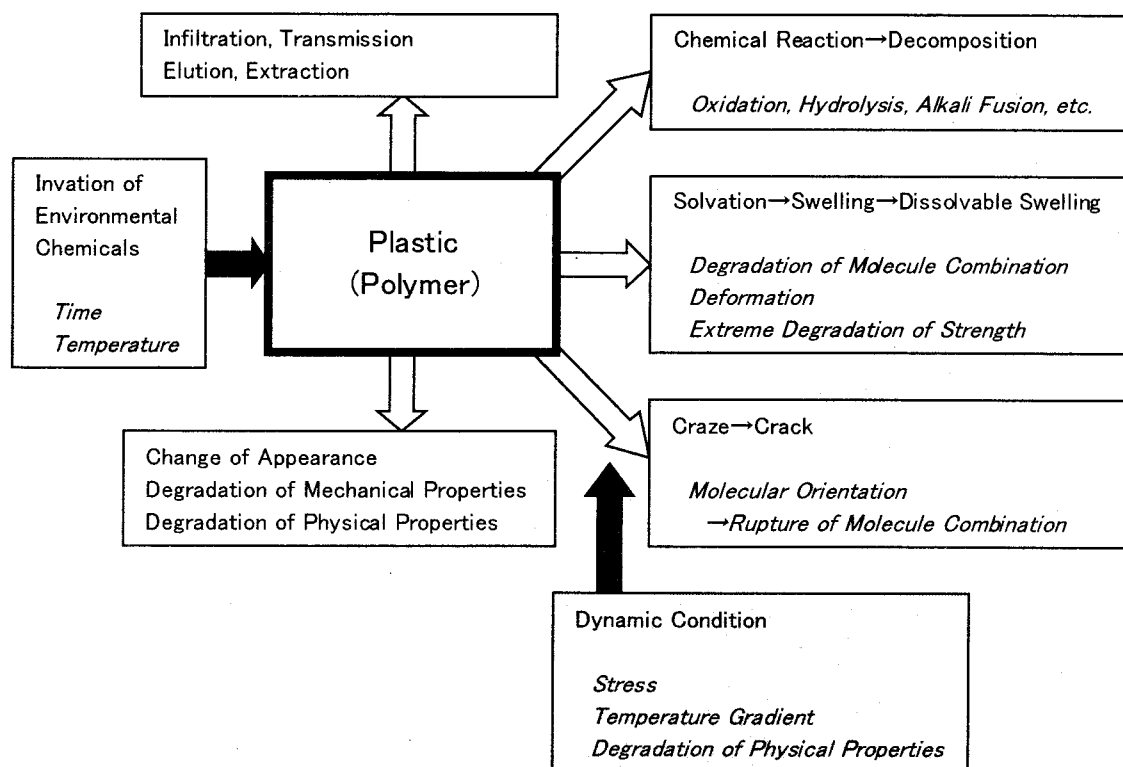


Fig. 2.1 Degradation Scheme of Plastic (English translation by the author)

連続繊維補強材をコンクリートと接して用いるときは、高濃度のアルカリ雰囲気環境におかれ、さらに、緊張材として使用される場合は持続して高い引張応力の作用も受ける。こ

のため、応力作用下の耐アルカリ性を明らかにする必要がある。連続繊維補強材は繊維と樹脂の複合材料であることから、それ自身の耐アルカリ性を左右する因子として、

- (1) 繊維の耐久性
- (2) 樹脂の耐久性
- (3) 繊維と樹脂の接着の耐久性

が挙げられる。以下では、構成材料である繊維、樹脂、これらの複合材料と連続繊維補強材、さらに連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の順に、耐アルカリ性に関する既往の研究を中心に記す。

1.1 繊維

連続繊維補強材では、引張強度や弾性係数などの力学的特性は繊維が受け持っているため、繊維の耐久性を把握することが重要である。

a) 炭素繊維

炭素繊維はポリアクリロニトリル等の高分子繊維を原料とするもの(PAN 系)と、石油ピッチを原料とするもの(ピッチ系)との2種類が主である。炭素繊維は、高温に耐え得る材料として宇宙開発のために生み出された材料であることから、酸素の存在下では酸化されるものの非酸化性雰囲気下では他の材料と比較にならないほど耐久性が高い。また金属のように常温で錆びることはなく、有機繊維のように溶媒に溶けることもなく、酸やアルカリに対する耐薬品性にも優れ、極めて安定な材料である。吸水量も0.03%~0.05%と極めて小さい³⁾。連続繊維補強材に使用されるPAN系2種類、ピッチ系4種類について20℃の10%NaOH水溶液に30日間浸漬した結果では、強度の低下はないと報告されている⁴⁾。

b) アラミド繊維

構造用材料として使用が検討されている高弾性パラ系アラミド繊維にはポリパラフェニレンテレフタルアミドからなるPPTA型と共重合型がある。PPTA型の代表的なものにケブラー、共重合型にはテクノーラがある。アラミド繊維は炭素繊維と同様に耐薬品性に優れており、一部の強酸を除いては侵されることはない。また、ケブラーは、その構造がホモポリマーであることに起因してテクノーラに比べて熱的性質やクリープ特性において勝ると言われている。これに対して共重合型のテクノーラは不完全な結晶部分と高配向の非晶部分から成り立っており、全体として比較的緻密な繊維構造を有し強酸、強アルカリに対してケブラーよりすぐれた性質を示すとされる。耐アルカリ性について、95℃の10%NaOH水溶液中で20時間後の強度保持率はケブラーが約40%、テクノーラが約95%⁵⁾⁶⁾、さらに同溶液20℃中で30日間浸漬した後ではケブラーが約80%、テクノーラは100%⁴⁾と報告されている。

c) ビニロン繊維

ビニロン繊維は、原料であるポリビニルアルコール($-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-$)_nをアルカリ浴中で湿式で紡糸し、高重合度のポリマーへと高倍率で延伸を行って、分子の配向度を高め高結晶化させて製造したものである。主鎖切断が起こりにくいために、アルカリの作用に対しては抵抗性があるといわれている⁷⁾。連続繊維補強材に使用されるビニロン(クラレ No.5516)繊維について 20℃の 10%NaOH 水溶液中で 30 日間の浸漬では強度の低下はなかったと報告されている⁴⁾。

d) ガラス繊維

ガラス繊維は、アルカリによって著しく劣化することが知られている²⁾。これは、ガラス繊維の主結合である($-\text{SiO}-$)が、水分、アルカリ水溶液分によって加水分解を生じる⁸⁾ためであり、水溶液分存在下での長期的な耐久性は乏しいとされている。魚本ら⁹⁾¹⁰⁾は、ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維そのものを 40℃の水酸化ナトリウム溶液(pH=14)に浸漬した後、静的引張試験を行い、破断強度と弾性係数の変化を検討している。さらに走査型電子顕微鏡により繊維の微視的な観察も行った結果、アラミド繊維と炭素繊維の耐アルカリ性はガラス繊維に比べ十分高いものであること、また、ガラス繊維のアルカリによる劣化はアルカリとガラス繊維が反応して強度を有しないアルカリ反応生成物を形成することにより生じること、さらにこの反応はガラス繊維表面から内部方向へ時間とともに均一に進行し、未反応部分の断面が減少して強度が低下することを明らかにしている。

以上のように、ガラス繊維のほか、アラミド繊維のうちケブラーで耐アルカリ性に関する若干の問題点が報告されているものの、炭素繊維、テクノーラはそれ自体アルカリに対して十分な耐久性を備えているとされている。また連続繊維補強材の表面は連続繊維を集束するための樹脂で覆われており、この樹脂が繊維の保護材としての役割を果たすことから、繊維自体が直接アルカリによって劣化する可能性は低いと考えられ、連続繊維補強材の耐久性は樹脂の性能に依存すると考えられる。

1.2 樹脂

連続繊維補強材用のマトリクスとして選択される樹脂は、熱硬化性樹脂がほとんどである。繊維との接着性や、耐薬品性、耐候性などに配慮した結果、代表的なものとして、エポキシ樹脂(EP)、不飽和ポリエステル樹脂(オルソ系 UP、イソ系 UP およびビスフェノール系 UP など)、ビニルエステル樹脂(ビスビスフェノール系 VE など)が用いられる¹⁾。

a) エポキシ樹脂

エポキシ樹脂は、配合次第で物性は大きく変化する。無水フタル酸を添加して硬化させるビスフェノール型は、強度や耐食性を要する高級用途に使用される。アミン硬化型はエステル結合をもたないので耐アルカリ性には優れているが酸には弱い。ノボラック型は耐熱性、

耐薬品性に優れている。

b) ビニルエステル樹脂

ビニルエステル樹脂は不飽和ポリエステル樹脂の一種で、エポキシ樹脂と同じ基本骨格を持つ。末端に親水基を持たないので耐食性に優れ、吸水性も少ない。ビスフェノール型は、酸、アルカリなど腐食性の強い環境に優れ、ノボラック型は、架橋密度が高く、耐熱、耐有機溶剤性に優れている。オルソ系、イソ系、ビスフェノール系と進むに従ってエステルが少なくなり、一般に樹脂のエステル濃度が小さいほど耐食性は増すことが知られている。樹脂の化学劣化、特に加水分解による劣化の主因は、樹脂中のエステルの加水分解によるものとされており、エステル濃度が半減すると耐水時間は約 20 倍にまで変化するといわれている¹¹⁾。

これら高分子材料の腐食は、金属材料と異なり電気化学的な説明はつけ難い。高分子材料の腐食の基本となるのは環境剤の高分子材料中への浸入である。環境剤の浸入後、あるいは浸入と同時に起こる腐食劣化には大きく分けて化学的な劣化と物理的な劣化にわけられる。化学的な劣化には、酸やアルカリによる加水分解反応、酸素、酸化剤による酸化反応、塩素化反応、スルホン反応、脱塩酸反応、エステル交換反応など種々の腐食反応がある。分子中の二重結合は反応性に富み、水酸基(-OH)、アミノ基(-NH₂)、スルホン酸基(-SO₃H)、カルボキシル基(-COOH)は耐水性を低下させ、エステル(-COOC-)、アミド(-CON<)はアルカリにより加水分解を生じやすい。物理的な劣化は、樹脂の分子間に液体分子が浸透、拡散して樹脂を膨潤(Swelling)させ、樹脂の重量、体積が増加し、機械的性質が低下する現象である。

環境剤が溶液、あるいは各種蒸気の形で高分子の中に浸入、拡散していく現象を収着(Sorption)と呼ぶが、一般に、この拡散については近似的に Fick の拡散法則

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 2.1}$$

ここに、 c : 材料中の環境剤の濃度

D : 拡散係数

x, t : 位置, 時間

が成り立つ場合が多いとされている。材料によっては短時間に進むものと徐々に進行するものがあり、さらに内部構造によっては環境剤の浸入が大きく、高分子分子の周りを浸入分子がとり囲む溶媒和(Solvation)の状態から膨潤、さらに溶解へと進む場合、単に膨潤、重量増加の状態に留まっている場合など、浸入の形態は様々である¹²⁾。また、薬液浸入による腐食形態は材料の種類、環境剤の種類等によって様々な形態を取る。たとえば無水フタル酸で硬化させるビスフェノール型エポキシ樹脂を水酸化ナトリウム水溶液中に浸漬した場合は樹脂が接液表面から直接溶解し腐食され、全面が均一に減肉していく表面反応支配の形態を取り、

その腐食速度は浸漬時間によらず一定で、腐食層は時間に比例して増加する。ノボラック型ビニルエステル樹脂をアルカリ水溶液中に浸漬した場合、加水分解は架橋部エステル結合で起こり、加水分解後ゴム状の腐食層を生じ内部への浸入の抵抗層となる拡散支配の形態を取り、腐食層は時間の $1/2$ 乗に比例して成長するので、劣化速度が減少していく望ましい腐食形態である。しかし腐食層は化学的に全く安定というわけではなくクラックやピットが発生し、かなりの強度低下をする場合がある¹³⁾。さらに、環境剤である浸入分子と高分子との間に極性の一致があるときには、両分子は結びつきやすく化学劣化を受けやすい。この場合、溶媒和の形をなして高分子と環境剤とが強く結びつき、これが強いと高分子物質相互の凝集を引き離し、そのあいだに環境剤が入り込んでゆき、膨潤を引き起こし、さらに甚だしい場合には溶解へと進む。したがって、浸入分子が単に高分子物質の中に入っているだけか、溶媒和を作るかによって、化学劣化の程度は大いに異なってくる。なお、OH 基、COOH 基、OCH₃ 基、NH₂ 基はアルカリや水を引き寄せる極性があるとされる¹²⁾。

樹脂の耐薬品性を判定する試験方法は、JIS、ISO、ASTM の中にいくつか規定がある。これらの試験方法は、樹脂試験片を一定温度に保持した試験液に規定時間浸漬させ、試験片の質量変化および外観変化、すなわち、光沢、変色、くもり、ひび割れ、き裂、膨潤、そり、分解、溶解などの有無から耐薬品性を判定するものである。奥田¹¹⁾はこれら 3 つの規格間で試験方法の比較を行って違いを取りまとめている。北條ら¹³⁾は種々の樹脂とアルカリ溶液の組合せにより耐アルカリ性を検討し、腐食形態を分類している。腐食形態には、樹脂の表面から溶解する反応支配タイプや、腐食層を形成しながら腐食が進行する拡散支配タイプなど金属と類似の腐食形態があり、樹脂にも金属と同様の腐食速度という概念が適用できるとして腐食の速度式を提案している。津田¹⁴⁾は、FRP に使用される不飽和ポリエステル樹脂とエポキシ樹脂を酸性あるいはアルカリ性の水溶液に浸漬し、湿潤重量と乾燥重量の測定を行うとともに、光学顕微鏡、赤外線吸収スペクトル法(IR)、X 線顕微鏡解析法(XMA)により破面および表面の観察を行い樹脂の劣化機構を検討している。両樹脂とも酸性環境では非常に優れた耐食性を示すが、アルカリ環境下においてはエステルの加水分解反応が起こること、またエステルを主鎖にのみもつ不飽和ポリエステル樹脂では表面近傍に腐食層が形成されるが、エステルを架橋部にもつエポキシ樹脂では分解された成分が表面から溶液中に溶出することが明らかにされている。

以上のように、樹脂の腐食機構は明らかになりつつあり、これらはの知見はアルカリ環境下における連続繊維補強材の劣化予測に基づく耐久性設計に役立つと考えられる。しかし、樹脂は製造過程における硬化条件により物理的・機械的性質が大きく異なること、また連続繊維補強材には繊維と樹脂の界面が存在することなどから、これらの試験結果をそのまま連続繊維補強材中の樹脂に当てはめることには無理がある。

1.3 複合材料と連続繊維補強材

複合材料の化学的劣化機構の基本となるのは環境剤の収着(Sorption)現象であることは一般の樹脂の場合と同様であるが、繊維との複合構造であることで特異な劣化を起こすことが知られている。すなわち、樹脂を通じて界面に拡散する分子水により共有結合が加水分解されるという化学的な劣化に加え、樹脂への環境剤の拡散・浸透がまず問題となり、次に繊維まで達した環境剤の作用によって繊維と樹脂の界面の剥離が進行して、複合材料の劣化・破壊に至る物理的な劣化機構がある¹⁾。環境材が樹脂を通じて吸収されると、樹脂の内側と外側、繊維と樹脂の間で不均一な膨潤が生じて内部に応力が生じる。この応力が界面に微小き裂の成長を促し、樹脂では内部に向けて拡散経路が広がり、さらに水分の吸収拡散が進行する。界面のき裂は微小き裂から連続した大きな割れへと成長するに至る。この結果、複合材料の物理的・機械的特性の低下をきたすといわれている¹⁵⁾。この機構の代表的なものに酸応力腐食(Acidic Stress Corrosion)¹⁶⁾がある。酸は樹脂中を拡散によって浸透せず応力によるひび割れなどの損傷を通じて浸透するので、樹脂のひび割れ抵抗性が、酸環境下の劣化に大きく影響するとの報告がある¹⁷⁾。また、一方向積層材や斜交積層材などの複合材料を水や温水へ浸漬し、疲労特性を中心とした機械的性質に与える影響を検討した結果¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾からも、水の浸入に伴い上記のような物理的劣化機構がみられ、さらに樹脂の降伏強度、界面の接着強度にも影響を与えており、その結果、複合材料の引張強度や疲労強度が影響を受けていることが示されている。

破断面の外観は、繊維と樹脂の縦方向引張強度、せん断強度および界面接着強度に左右される界面破壊の程度により決定される。強固に接着された炭素繊維—エポキシ樹脂系では、縦方向引張強度/界面せん断力比が比較的小さく、破断面はかなり平滑になる(Fig. 2.2)。これに対し、ガラス繊維—ポリエステル樹脂系、ケブラー49 繊維—エポキシ樹脂系の破面は、前述の比が大きいため、破断面は大量の繊維引抜きを伴った刷毛状の外観を呈する(Fig. 2.3)。また、劣化によりこの比のバランスが変化すれば、破断面の外観も大きく変化するといわれている。

以上のように、複合材料の環境剤中の劣化では、その構成材料である繊維や樹脂そのものの劣化のほか、繊維—樹脂界面への環境剤の浸入による界面の劣化が発生するため、劣化機構は複雑なものとなる。また、環境剤の複合材料への浸透は、界面では毛細管現象により樹脂内における拡散速度よりも 100 倍程度もの浸透速度で起こることが知られており、これが原因で繊維—樹脂界面の劣化が加速する。したがって、逆に、界面の劣化を観察することにより、環境材の侵入程度を予測することができるものと思われる。

複合材料である連続繊維補強材の耐久性に関する既往の研究は、主として連続繊維棒材についての耐アルカリ性について行われている²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾。アルカリ環境としては、コンクリート中の細孔溶液を模擬したアルカリ溶液、たとえば $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2g/l, KOH 14g/l, NaOH

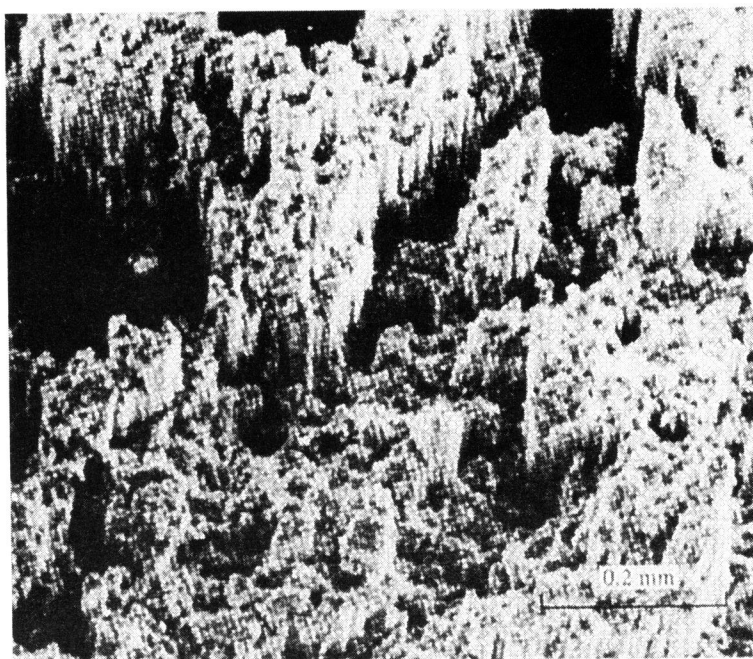


Fig. 2.2 Fracture Surface (1)

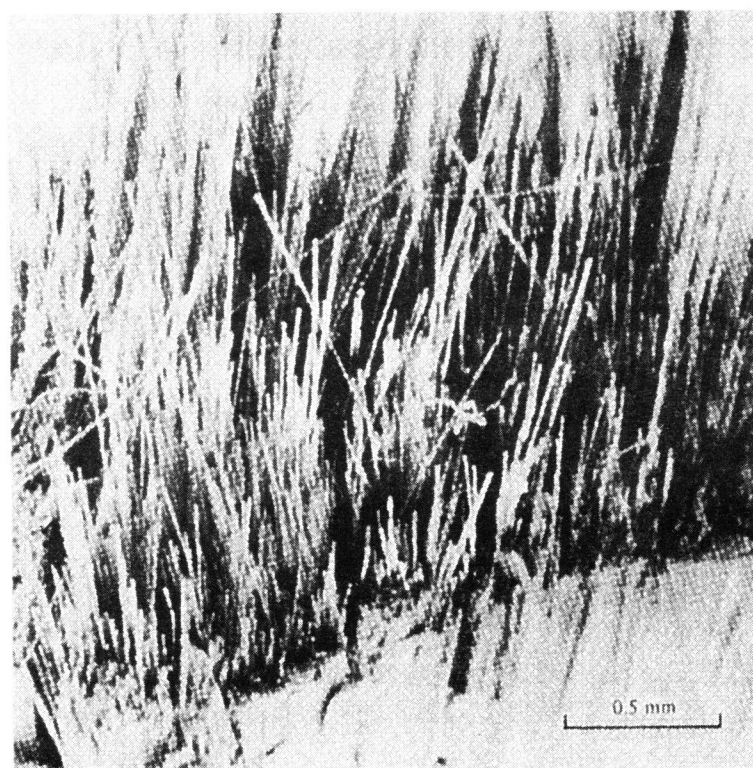


Fig. 2.3 Fracture Surface (2)

10g/l, pH=13 といった溶液への浸漬に加え、コンクリート中に緊張・非緊張の状態で埋設したものもある。試験要因は主として温度と応力であり、促進を目的として高温、高応力が与えられている。浸漬期間は1年程度までが多い。アルカリ環境中では重量測定や緊張力の測定が行われ、所定の期間経過後に引張試験により引張強度、ヤング係数やクリープ破断性状から耐アルカリ性を確認している。これらの実験では、促進環境である高温、高応力のアルカリ環境では若干ながら性能は低下傾向であり、高温、高応力ほど劣化程度は大きいとする報告がある一方で、アルカリ溶液への浸漬は実際のコンクリート中の環境よりも厳しい環境を想定したものであり、通常的环境では顕著な劣化は認められないとしているものもある。いずれにせよ、十分なデータが得られているとは言えないのが現状であり、また、高温、高応力がもたらす促進率が明らかになっておらず、さらなる検討が求められている³⁰⁾。

連続繊維補強材の劣化メカニズムを把握するためには、浸漬中あるいは浸漬後の引張試験における AE の測定や、浸漬後の断面に対して走査電子顕微鏡(SEM)や電子線マイクロアナライザー(EPMA)を用いた分析を行うことも有用である。

AE 波は固体中で起こるき裂発生または進行にともなってひずみエネルギーが解放される時に発生する弾性波である。固体表面に AE 変換子を取りつけ AE 波を受信し、これを増幅し電気信号として処理する。発生する弾性波を計数する方法にはいくつかあるが、あるしきい値を越えた回数を計数するリングダウン計数、イベントの発生から終了までを1カウントとするイベント計数が主である。計数を用いた破壊機構の分析の代表的なものに、カイザー効果の有無が挙げられる。カイザー効果は AE に特有な非可逆的現象である。一度荷重を加えて AE を発生させた後で除荷し、再び負荷すると先行して受けた荷重を越えるまで AE が発生しない現象で、主として材料の弾性域内でみられる。FRP でもカイザー効果が現れるが高い応力になると効果の発現は鈍るようになる。この現象の成立比から材料の内部安定性を評価する指標としてフェリシティー比がある。

$$FR = P_{AE} / P_{1st} \quad \text{Eq. 2.2}$$

ここに、FR: フェリシティー比(Feracity Ratio)

P_{1st} : 先行して受けた最大荷重

P_{AE} : 以後の載荷で AE が発生し始めた荷重

フェリシティー比が 0.95 以上の場合に、FRP が健全であるとする提案がなされている³¹⁾。また、破壊が大きいほど大きな振幅の AE が発生すると考えられるが、FRP のように減衰の大きい材料では距離による影響が大きいので、さらに持続時間を加味して AE 波のエネルギーの大きさを簡略的に判定する方法が用いられる。芳我ら³²⁾は、持続時間×最大振幅の矩形波で $10V \times 1ms$ のエネルギー値を 1000 カウントと定義した相対表示によって、エネルギーカ

ウントの小さいものから繊維と樹脂の剥離および繊維の引抜き、樹脂の割れ、樹脂のき裂先端の応力集中による隣接繊維の切断、棒材内のクラックの急速な進展と全体破断に区別している。

一方、武若ら³³⁾は、種々の連続繊維棒材のアルカリ浸漬試験を行い、SEM と EPMA を用いた分析を行っている。その結果、劣化の原因に樹脂のアルカリ劣化が考えられること、また、アラミド繊維を用いた場合は繊維自身の劣化も一因となっている可能性があり、同一繊維系の連続繊維棒材における劣化程度の差が繊維に対する樹脂の被覆厚さの違いによる可能性があることを報告している。

以上のように、連続繊維補強材の表面の樹脂にアルカリ劣化の可能性があること、棒材の劣化形態の一つとして繊維と樹脂に界面に生じるき裂の発生があることなど、連続繊維補強材のアルカリ劣化メカニズムが明らかになりつつある。なお、アルカリ環境が連続繊維補強材の引張特性に与える影響は少ないという結果が得られているが、以上の分析結果から考えると、これは被覆部分の劣化や界面のきれつは比較的表層付近にとどまり、引張特性に寄与する有効断面への顕著な影響には至らなかったためと考えられる。しかし、連続繊維補強材自体の引張特性に与える影響が少ない場合でも、部材レベルでは変形性状に影響が現れる可能性があり、その検討も必要である。

1.4 連続繊維補強材を用いたコンクリート部材

連続繊維補強材を用いてコンクリートを補強する場合、連続繊維補強材自身の耐アルカリ性のみでなく、コンクリート部材としての耐アルカリ性について検討する必要がある。それは、コンクリート中あるいはコンクリートと接して用いる場合に連続繊維補強材がおかれる環境が、連続繊維補強材単体で行った実験では必ずしも模擬できているとはいえない可能性があることに加え、連続繊維補強材とコンクリートとの付着の耐アルカリ性に関わる問題が存在するからである。

連続繊維棒材のコンクリートとの付着に与えるアルカリ環境の影響については、棒材をアルカリ溶液に浸漬した後にコンクリート中に埋設して行う片引試験、棒材をコンクリート中に埋設した供試体全体をアルカリ溶液に浸漬した後の片引試験³⁴⁾あるいは両引試験が実施されている。その結果、前者では促進環境下で棒材表層部の劣化が原因と思われる付着の低下が認められたとしているが、後者では低下は見られなかったとしている。前者は後者より厳しい環境であると推定できるが、これらの環境が連続繊維棒材に与える影響の定量的評価、あるいは、実際のコンクリート中における環境との関係については明確にされていないのが現状である。一方、部材全体の耐久性の検討では、連続繊維棒材を緊張材とするプレテンション PC はりをアルカリ溶液中に浸漬しその後曲げ試験を実施した例があり³⁵⁾、引張特性や付着特性の劣化が原因と見られる耐力の低下やひび割れ分散性の低下が起こる可能性が示さ

れている。ガラス繊維棒材や一部のアラミド繊維棒材を除けば、連続繊維棒材自体の引張特性はアルカリ環境下で顕著には変化しないとされていることから、部材の耐荷性状に与える影響が大きいのはコンクリートとの付着の長期的性状であると考えられる。

2. 連続繊維補強材のコンクリートとの付着とその長期的性状

一般に、補強材とコンクリートとの間に付着応力が作用する局面としては、

- (1) 引張応力の方向(ひび割れと直角方向)に配された場合
- (2) プレテンション PC 用緊張材として用いる場合

が挙げられる。(1)は、曲げ補強材にしばしば見られ、曲げ付着(Flexural Bond)、(2)は伝達付着(Transfer Bond)と呼ばれる。これらの局面において、十分な付着性能が確保されていない場合は、(1)ではひび割れ区間などで棒材のすべり出しが生じ、部材のひび割れ幅や変形量が大きくなるとともに、耐力も低下することがあり、また、(2)では所定の緊張力が導入されなくなる。これらは初期のみでなく、長期的にも、付着応力が緩和されるように補強材がすべること(付着クリープ)によって発生する可能性があるものである。

連続繊維補強材をコンクリートに用いる場合も、コンクリートとの付着性状を明らかにするとともに、その長期的性状を把握しておくことが重要である。長期的性状を検討する際には、特に、1.に示したような、コンクリートの持つアルカリが原因の樹脂の劣化が引き起こす付着の劣化に加えて、付着応力がコンクリートと繊維の間に存在する樹脂により伝達されることから、常温でもクリープ変形しやすいという樹脂の特性を念頭に置く必要がある。

以下では、まず、鉄筋や PC 鋼材を対象としたコンクリートとの付着とその長期的性状に関する既往の研究をまとめ、続いて、連続繊維棒材、連続繊維シートに関する既往の研究を記す。

2.1 鉄筋・PC 鋼材のコンクリートとの付着

a) 付着の分類と基礎式

コンクリート中に埋設して用いる補強材である異形鉄筋と周辺コンクリートとの付着は、一般に以下の3つの機構から成り立つとされている³⁶⁾。

- (1) 膠着作用(Chemical Adhesion).....鉄筋とコンクリートとの間の界面の粘着力
- (2) 摩擦作用(Friction).....界面のすべりに対する摩擦抵抗

(3) 機械的作用(Mechanical Interaction)..... 界面の凹凸によるかみ合わせ作用

丸鋼の場合には、その付着作用を(1)および(2)によっており、異形鉄筋の場合には、表面の突起によって(3)に主として依存することになる。また、付着応力が発生する個所によって以下の3つに大別できる³⁷⁾。

- (1) 局部付着
- (2) 定着付着
- (3) ひび割れ間付着

これらの付着性状を表現する方法としては、鉄筋の表面上でのある1点での局所の付着応力とその位置でのコンクリートと異形鉄筋の軸方向の相対ずれ量(すべり)の関係(τ - S 関係)が最も一般的とされる。これは以下の付着の基礎微分方程式³⁸⁾

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{(1+np)}{E_s A_s} u \tau_x \quad \text{Eq. 2.3}$$

ここに、 τ_x 、 S_x ：位置 x における付着応力，すべり

u ：補強筋の周長

n ， p ：弾性係数比(E_s/E_c)，補強筋比(A_s/A_c)

E_s ， A_s ：補強筋の弾性係数および断面積

E_c ， A_c ：コンクリートの弾性係数および断面積

において、付着応力 τ_x がすべり S_x の関数で与えられれば、任意の境界条件の下で S_x ， τ_x や P_x (鉄筋引張力)の分布が求められるからである。さらに、有限要素法によってRC部材の解析を行う上での付着構成則としても τ - S 関係の必要性が高まっている。

これまでに多くの τ - S 関係モデルが提案されているが、各研究者によってモデル化の背景となった付着試験方法、すべり量のとらえ方、供試体中での応力伝達経路、拘束条件、付着長、モデル化する鉄筋位置などが異なっているため、研究者ごとに異なったモデルとなっている。すなわち、 τ - S 関係は多くの要因に影響を受ける。提案された初期の頃は、短い付着長の片引実験から平均付着長を求めてモデル化したものが多かったが、これは長い付着長を有する通常の部材に適用が困難なため、比較的長い付着長を有する供試体を用いた部材試験的な片引実験も行われるようになった。この場合、コンクリートの変形を無視し、以下のようにしてモデル化されている³⁹⁾⁴⁰⁾。まず、鉄筋に沿った各位置におけるひずみを測定することにより鉄筋のひずみ分布を求める。鉄筋に沿った任意の点におけるすべりは、片引試験で

は自由端から考えている点までのひずみを積分した値に自由端変位を加えたもので、両引試験では供試体中央部でのすべりのない点から考えている点までのひずみを積分したものである。次に、鉄筋に沿った任意の点における付着応力を求める。鉄筋とコンクリートの間に付着応力 τ が作用すれば鉄筋の軸応力 σ_s が変化することから、これらはFig. 2.4に示す鉄筋の微小長さにおける釣合い条件より、次式のようになる。

$$\tau_x = \frac{A}{u} \frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{D}{4} \frac{d\sigma_x}{d\varepsilon_x} \frac{d\varepsilon_x}{dx} = \frac{ED}{4} \frac{d\varepsilon_x}{dx} \quad \text{Eq. 2.4}$$

ここに、 τ_x : 位置 x での付着応力
 E, A : 鉄筋の弾性係数および断面積
 u, D : 鉄筋の周長および直径
 σ_x, ε_x : 位置 x での鉄筋の応力およびひずみ

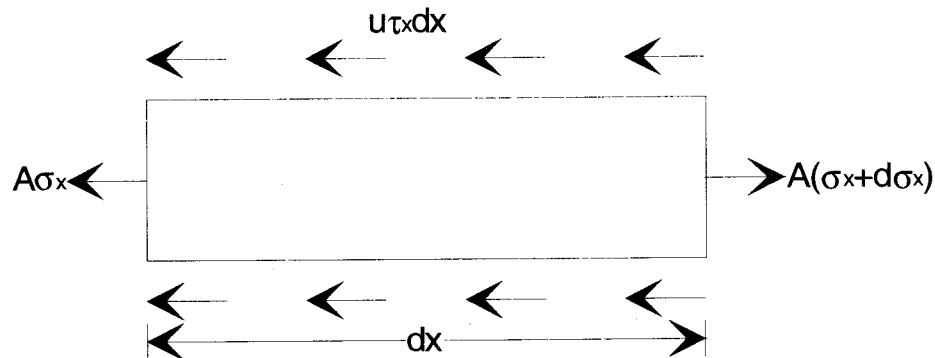


Fig. 2.4 Stress Equilibrium between τ_x and σ_x

これらにより得られたすべりおよび付着応力から鉄筋に沿った任意の点における τ - S 関係が求められる。前述のとおり τ - S 関係は多くの要因に影響されるため、従来の研究では、 τ - S 関係にコンクリート強度や鉄筋径をパラメータとして取り入れて定量化されている。

b) 曲げ付着とひび割れ面での付着

棒部材が曲げを受けると、補強材に付着応力が生ずる。部材に曲げひび割れが発生すると、その断面付近の補強材の引張応力は急増し、そのためにひび割れの両側では付着応力が大きくなる。荷重がさらに増大すると、曲げ付着は次第に部材端の方向に移動してゆき、プレテンション PC 部材の場合は、後述する伝達付着の領域にまで達することになる。平滑鋼材のように機械的抵抗力が小さい補強材を用いる場合や、付着長が短い場合では、曲げ付着が部材全体に行きわたって補強材がすべり出し、それ以上の荷重に耐えられなくなる付着破壊を呈することがある。これに対し、異形鋼材やより線状鋼材のように機械的抵抗力が比較的大

きな鋼材では、さらに大きな荷重に耐えることができる。これらの補強材でも、荷重の増加に伴い一般にすべりをともなうが、最終的にはコンクリートの圧壊または鋼材の破断となる曲げ破壊を呈することが多い。

ひび割れ近傍における曲げ付着に関する研究は、ひび割れ近傍におけるひび割れ面からの鋼材の拔出しが、コンクリート中の応力状態は実際とは異なるものの簡易的に把握できることから、片引試験によって τ - S 関係を求めることが多い。また、さらに実部材に近い応力状態となる方法として、両引試験法やはり型供試体を用いた試験方法が用いられているが、これらも τ - S 関係を求めることにより曲げ付着を評価している。

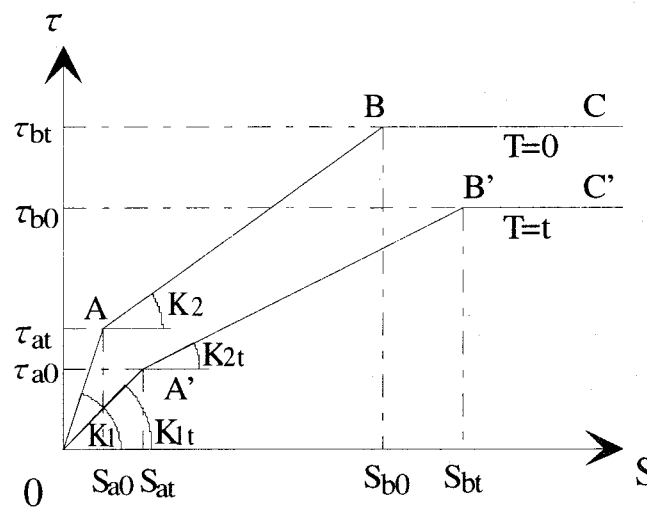


Fig. 2.5 τ - S Relationship (Tri-Linear Model)

c) 曲げ付着の長期的性状

一方、ひび割れ幅の進展やたわみの増大に関しては、長期の持続荷重に対する付着性状を把握しなければならない。持続荷重を載荷する片引試験によって、 τ - S 関係に与える時間の影響を調べた研究⁴¹⁾では、時間の経過による付着応力の低下は、すべりが大きいほど著しいとしている。また、持続荷重を載荷する両引試験によって長期経過後の τ - S 関係をモデル化した研究では、付着応力およびすべり量は乾燥収縮の影響を大きく受ける⁴²⁾こと、持続荷重下における付着応力およびすべり量は載荷後 1 日間に大きく変化し、以後は乾燥収縮を受ける供試体ですべり量の増大とともに付着応力も徐々に増加するのに対し、乾燥収縮を受けない供試体ではすべりの増加量は小さく、付着応力は緩やかに低下する⁴³⁾⁴⁴⁾としている。また、Fig. 2.5に示すような、トリリニアモデルをベースとし、経時的な付着劣化を考慮した τ - S モデルが提案されている。

RC 曲げ部材を対象として、付着クリープがたわみやひび割れ幅に与える影響を定量化した

研究⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾では、拔出しによる付加回転たわみが初期載荷時で 35～50%、長期で 48～53%程度となること、ひび割れ幅に与える影響は 4～10%程度となること、また付着クリープが平均付着応力の低下に与える影響は大きい、たわみに与える影響は、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮がかなり大きいことが報告されている。また、PC 曲げ部材の持続荷重下におけるひび割れ性状やたわみの増大について検討した研究⁴⁸⁾では、鉄筋応力が小さく持続載荷開始時にはひび割れ定常状態に至っていなくても短期間に新しいひび割れが発生し、いわゆるひび割れ定常状態に至ること、コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる圧縮側のひずみの増大量は引張側に比べて大きく、たわみの増加は主に圧縮側ひずみの挙動に支配されることが報告されている。

このように、鋼材に関しては付着クリープに関してある程度の研究はなされているものの、コンクリート強度と付着クリープ性状の関係や付着クリープの進展状況など付着クリープに関して未解明な部分が多いのが現状である⁴⁹⁾。

d) 伝達付着と PC 鋼材のコンクリートとの定着

プレテンション PC 部材では、プレストレス力の緊張材からコンクリートへの伝達は両者間の付着すなわち伝達付着によりなされるため、プレテンション PC 部材における伝達付着は非常に重要であり古くから研究がなされている。

PC 鋼材の緊張力を導入した直後の定着域における諸現象の相互関係⁵⁰⁾を Fig. 2.6 に模式的に示す。

- (1) PC 鋼材のコンクリートから露出している部分は無応力状態となり、鋼材の直径は緊張力が失われただけ増大し、周囲のコンクリートは圧縮(接触圧)を受けて、付着にとっては有利に働く。...(a)
- (2) 緊張力を導入すると、鋼材はコンクリート中に若干のすべり込み(相対変位)を生じ、その分布は部材端で最も大きく、部材端から離れるにしたがって減少し、ある位置からは相対変位は 0 になる。...(b)
- (3) 相対変位が生じていない領域での PC 鋼材の残存緊張力は一定値(P_t)である。この P_t の値は、コンクリートの弾性収縮のため、導入前の緊張力 P_i より若干小さい。相対変位が生じている領域での残存緊張力 P_x は、部材端で 0、部材端から離れるにしたがって増大し、 P_t に漸近していく。...(c)
- (4) P_x が与えられると付着応力分布は一義的に与えられる。...(d)
- (5) コンクリート断面の軸方向圧縮応力(プレストレス)は、部材端では 0、部材端から離れるにしたがってその合力 P_{cx} は増大し、ある位置((e)の B 点)からは一定値($P_{cx} = P_t$)となる。さらに離れると、応力の乱れはなくなり、通常の方法力学の計算方法がそのまま適用しうる領域となる。...(e)

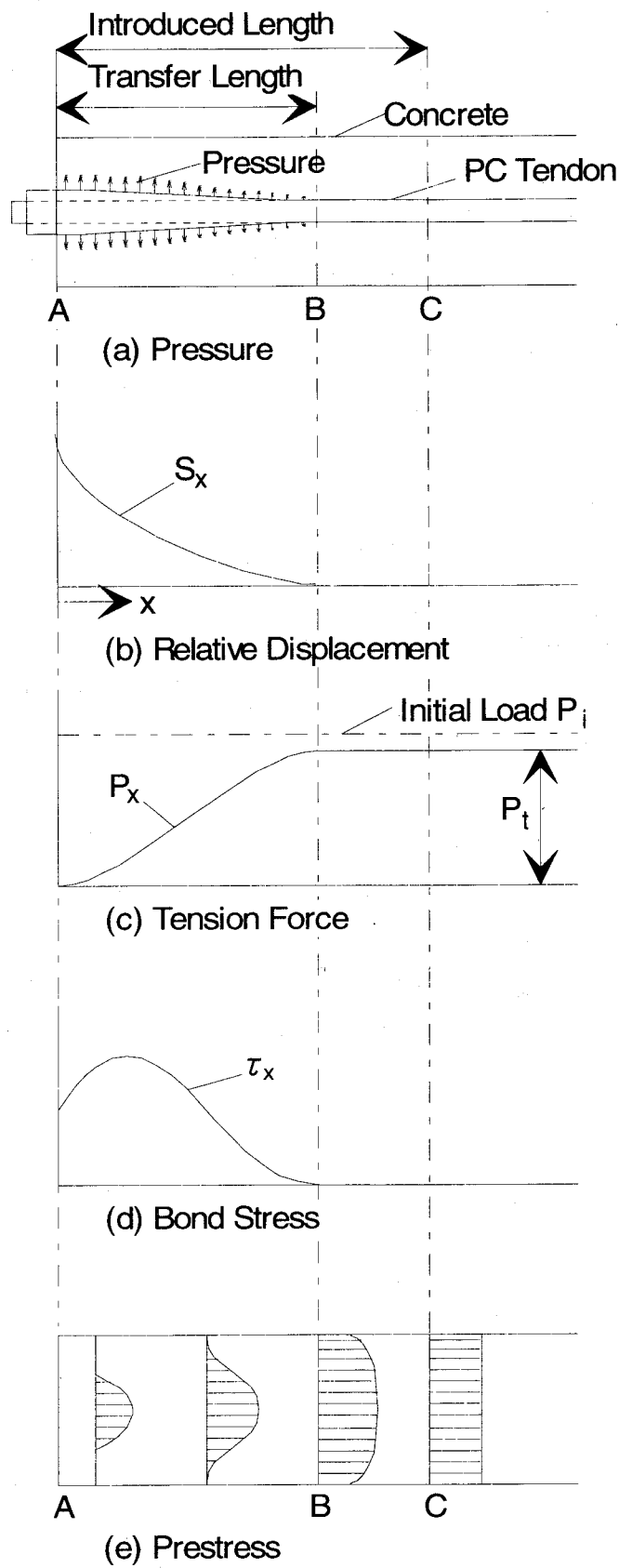


Fig. 2.6 Relationship of End Region Behaviors

伝達付着は、以下のような機構の異なるいくつかの要素からなっている⁵¹⁾。

(1) 接触圧に関係する要素

- ・ PC 鋼材の径の増加による摩擦抵抗 (τ_1)
- ・ コンクリートのプレストレスにともなう横方向ひずみに基づく把握力 (τ_2)

(2) 軸方向に分布する要素

- ・ くさび形による抵抗 (τ_3)
- ・ PC 鋼材とコンクリート間の粘着力 (τ_4)
- ・ 機械的抵抗 (τ_5)

このうち、 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 はプレテンション部材独特の付着形態である。すなわち、緊張力を解放された鋼材はいくぶん短縮し (τ_1) 、同時にくさび形を形成して定着をある程度強化するものと考えられ (τ_3) 、その際、周囲のコンクリートは軸方向プレストレスにともなう横方向ひずみも生ずるから、接触圧はさらにその影響も受けて変化し、したがって摩擦抵抗も変化する (τ_2) 。 τ_4 は鋼材とコンクリート間に相対すべりが生じない間、存在する粘着力に基づく付着である。 τ_5 は鋼材表面の凹凸に基づくもので、異形鉄筋やストランドにみられる付着である。一般に緊張力の定着が完了する付近では、粘着力 (τ_4) が大きな役割を占め、部材端付近では機械的抵抗 (τ_5) が、それらの中間では摩擦抵抗 (τ_1) が支配的であると考えられる。しかし、これら $\tau_1 \sim \tau_5$ の分布は、鋼材の表面形状などによって異なり、かつ極めて複雑であるため、これらを実験的に求めることは困難である。よって、伝達付着に関する研究の大半は部材端から PC 鋼材の残存緊張力 P_x が一定値になるところまでの距離である伝達長を評価するものとなっている。

伝達長の測定方法には以下のようなものがある⁵²⁾。

- (1) コンクリート表面の軸方向ひずみ分布を測定して求める方法
- (2) 部材端における PC 鋼材のめり込み量から推定する方法
- (3) 定着ブロック状供試体の定着耐力試験による方法

(1)の方法は、多点ひずみ測定を必要とするためにかなり手間を要するが、より直接的な方法である。これに対し、(2)の方法は、めり込み量の測定は容易であるが、間接的な方法であり結果は近似的である。

(2)の方法を用い、部材端における PC 鋼材のめり込み量が、Fig. 2.7に示す網掛け部分の面積を $E_s A_s$ で除したものとなることから、部材端から緊張力が一定値に達する点までの長さ L_t は次式で与えられるとした研究⁵³⁾がある。

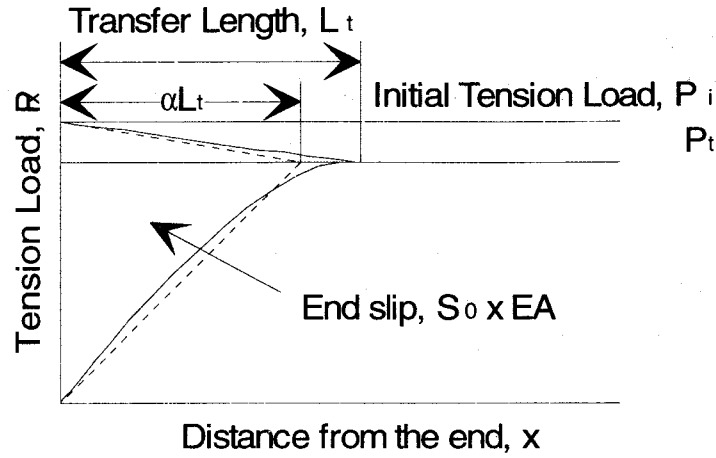


Fig. 2.7 End Slip S_0

$$L_t = \frac{2E_s A_s}{\alpha P_i} S_0 \quad \text{Eq. 2.5}$$

ここに, S_0 : 部材端における PC 鋼材のめり込み量
 E_s, A_s : PC 鋼材の弾性係数および断面積
 P_i : PC 鋼材の初期緊張力
 α : 補正係数

α は, 定着完了付近で鋼材緊張力分布 P_x が曲線状となるのを折線と仮定したために生ずる誤差を補正するための係数である. α は緊張材とコンクリートとの付着性状により影響を受けるため, その値の決定方法に問題が生ずるが, 実験的に, 7 本より線に対しては $\alpha=0.8$ としている. また, $\phi 12.7\text{mm}$ のより線の場合, $P_i = 0.8P_u$ (P_u : 鋼材の引張力)として L_t を次式により求める⁵⁴⁾としているものもあるが, これは α を約 0.7 とした場合に相当する.

$$L_t = \frac{3.5E_s A_s}{P_u} S_0 \quad \text{Eq. 2.6}$$

(3)の方法⁵⁵⁾は, 固定端において PC 鋼材がすべり始める限界の緊張力減少量を求め, これを付着長である供試体長さに対する定着可能プレストレス力とするものである. 初期緊張力を定着するのに必要な付着長を伝達長と定義するという観点からすれば, 最も概念的理解に役立つ方法といえるが, 供試体の長さを種々変えなければならないので面倒である. 以上,

通常は実用性から(1)あるいは(2)の方法がとられている。

e) 伝達付着の長期性状

上記の方法による実験の結果より、伝達長への影響としては、以下の要因が挙げられている。

(1) PC 鋼材関係: PC 鋼材の径, 表面状態, 導入緊張力

(2) コンクリート関係: 強度, 種類, 断面の大きさ

(3) その他: PC 鋼材の配置位置, 緊張力の導入方法, コンクリートの締固めの程度, 時間経過の影響

(3)に見られるように、伝達長は時間の経過に伴って、コンクリートの乾燥収縮、クリープなどの影響を受けて増加する。平滑鋼線を用いた実験⁵⁶⁾では、伝達長は時間経過に従っておよそ 2 倍ぐらいまで増加するが、異形鋼材やより線状鋼材を用いた実験⁵⁷⁾⁵⁸⁾⁵⁹⁾⁶⁰⁾では、時間的増加はほとんどなく、10%程度までとなっている。また、PC 鋼材表面に作用するコンクリートとの接触圧に基づき、接触圧に摩擦係数を乗じた値を付着応力とする接触圧理論による計算結果⁵¹⁾では、コンクリートの終局時のクリープ係数を 2, 終局収縮率を 20×10^{-5} とすると、錆びつき平滑鋼線の終局時の伝達長は、初期値の約 1.5 倍となっている。このように、機械的抵抗力が小さい平滑鋼線を用いるとかなりの増加があるが、機械的抵抗力が大きい異形鋼材やより線状鋼材などを用いると時間的増加はほとんどないようである。

2.2 連続繊維棒材のコンクリートとの付着

a) 連続繊維棒材のコンクリートとの付着

連続繊維棒材には多様な種類があり、その種類ごとに、寸法のみでなく表面や断面の形状、さらには弾性係数が異なっているため、種類の異なる連続繊維棒材の比較や鋼材との比較を行うのには大きな困難が伴う。そのため、多くの種類の連続繊維棒材を対象とした研究では定性的な評価に留まっているケースが多く、また、1 種類を対象とした場合は、連続繊維棒材という範疇に対しては汎用性に欠けている。このような中で、連続繊維棒材の付着試験に用いられる方法は、一般に、鋼材と同様に片引試験が多い。さらに、実部材に近い方法として、両引試験、はり型、片持ちスラブ型供試体を用いた試験方法などが用いられている。これらでは、寸法や弾性係数など棒材間の共通の諸元に着目して付着性能の比較検討が行われている。

初期の頃は、鋼材と同様に、短い付着長の片引試験から平均付着強度を求める研究が多く見られた。たとえば⁶¹⁾、連続繊維棒材の種類によっては自由端すべりが異形鉄筋と比較して大きくなることや、巻付け型の連続繊維棒材では棒材本体と巻付け繊維との界面の樹脂の剥

離によって付着破壊が生じることなどが報告されている。この報告では、連続繊維棒材の付着の評価指標として、連続繊維棒材ではすべりがは大きくなり、また、すべり量が 0.1mm 以下の付着応力はばらつきが大きいと、異形鉄筋の場合と同様な 0.002ϕ または 0.005ϕ のように非常に小さいすべり量時の付着応力で付着性能を判断するのは不適切であると提案している。なお「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」⁶²⁾によれば、付着応力の算定においては、異形鉄筋のようなコンクリート強度による補正は行わず、また自由端変位が 0.05 、 0.1 および 0.25mm の際の平均付着応力を報告するとしている。その後、付着機構を検討するため、異形鉄筋と同様に、付着長の異なる供試体で片引試験を行い、ひずみ分布を測定することにより、局所的な τ - S 関係を求めた研究も行われるようになった⁶³⁾⁶⁴⁾⁶⁵⁾⁶⁶⁾。これらの研究によると、付着長の違いが τ - S 関係に与える影響は異形鉄筋に比べて小さいこと、棒材位置に関わらず同一の τ - S 関係が成り立つこと、棒材の表面形状の違いにより付着性状が大きく異なることが報告されている。以上の連続繊維棒材の片引試験から、ある程度までは連続繊維棒材の付着機構が推定できるようになってきている。連続繊維棒材の付着性状は鋼材と異なるという結果が得られているが、その理由として、連続繊維棒材の弾性係数が鋼材よりも低く、棒材によってはポアソン比が大きいこと、棒材表面が鋼材よりも剛性の低い樹脂で覆われていることなどが考えられる。

両引試験では、鋼材と同様に、ひび割れ定常状態での最大ひび割れ間隔によりひび割れ分散性を表し、付着性能を比較検討した例⁶⁷⁾や、**Fig. 2.8**⁶⁸⁾に示す引張協力効果(Tension Stiffening Effect)、すなわち、付着によりひび割れが発生した後もコンクリートが引張力の一部を負担する効果を指標として検討した例⁶⁹⁾⁷⁰⁾がある。

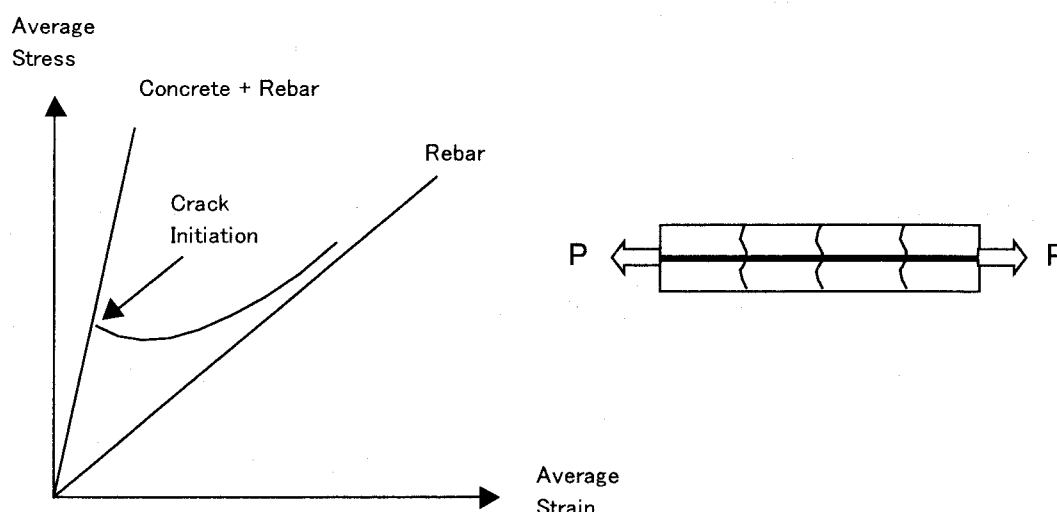


Fig. 2.8 Tension Stiffening Effect

一方、連続繊維棒材をプレテンション PC 用緊張材として用いる(連続繊維緊張材)場合、コンクリート中に定着させるためには、PC 鋼材と同様に所定の応力が導入されるまでの伝達長が必要である。連続繊維緊張材の伝達長の測定方法は鋼材のそれと基本的に同じである。各種の連続繊維緊張材の測定例⁷¹⁾を Table 2.1 に示す。伝達長は 10~125φ と大きなばらつきがあるが、PC 鋼より線の場合の 65φ および異形 PC 鋼材の場合の 100φ と比べて同程度と考えられる。

Table 2.1 Transfer Length of FRP Tendons

| Configuration | Fiber | Nominal Diameter φ (mm) | Tension Force Ratio /P _u * (%) | Transfer Length/φ |
|----------------|--------|----------------------------|--|----------------------------------|
| Strand | Carbon | 10.5 | ≈60 | ≈65 |
| | | 12.5 | ≈45 | 30~65 |
| Blaid | Aramid | 8 | 65 | 30~35 (w/o Sand) ≈20 (w/Sand) |
| | Carbon | 8 | — | 16 |
| Spiral Winding | Aramid | 6 | 55 | 42 |
| | | | 76 | 58 |
| Indented | Carbon | 8 | 36 | 125 |
| | | | 75 | 125 |
| Plate | Aramid | 6.2** | — | (≈10) |
| Lattice | Glass | 8 | 37 | (19) |
| | | | 41 | (19) |
| | | | 50 | (19) |
| Rope | Aramid | — | 63 | — |

* P_u: Ultimate force ** Diameter of an imaginary right circle

b) 連続繊維棒材のコンクリートとの付着の長期性状

連続繊維補強材のコンクリートとの付着クリープ性状は、鋼材と同様にたわみやひび割れ幅の長期変化に大きく影響する。連続繊維棒材を主筋に用いたはり部材の持続曲げ荷重下における部材の挙動に関する研究⁷²⁾⁷³⁾では、時間の経過とともにコンクリートの引張協力効果が低下すること、長期にわたるたわみの予測には、連続繊維棒材のクリープおよびコンクリートとの付着クリープ性状を明らかにする必要があること、ひび割れが複数本発生してひび割れ間で短い付着長となった場合、曲げ部材の長期たわみおよびひび割れ幅に与える付着クリープの影響は大きいことが報告されている。

一方、伝達長に与える時間経過の影響については、プレテンション PC 部材における 1 ヶ月程度にわたる検討がなされた丸山らの例などがあるが、定量的な評価には至っていないのが現状である。

2.3 連続繊維シートとのコンクリートとの付着

コンクリート構造物に対する連続繊維シートの補強効果は、コンクリート表面に貼付けた連続繊維シートに、樹脂を介してコンクリートからの引張応力を面内方向で伝達させることによって得られるものである場合がほとんどである。したがって、コンクリート中に埋設して用いる棒材の場合と同様、連続繊維シートとのコンクリートとの付着は非常に重要であり、その挙動を明らかにする必要がある。なお、連続繊維シートの適用方法や適用目的によっては、必ずしもこの付着が完全に近い状態である必要がない場合もある。棒部材に対して連続繊維シートの巻付けを行い、曲げ靱性の向上を目的としている場合がこれに該当する。すなわち、コンクリートとの付着の程度が低いことで、ひび割れを跨ぐ部分での連続繊維シートの局所的な引張応力の集中が緩和され、脆性的な破断を起こしにくくなり、より大きな靱性が得られると考えられる。同様の現象は鋼管に充填したコンクリートの耐荷性状においても確認されているが、連続繊維シートによる補強層は非常に薄く脆弱であるのが一般的で、固定するという観点からの付着が必要となること、また、付着の程度が靱性に与える影響は明らかになっていないことから、付着性状を評価する必要があることには変わりはない。

付着試験方法としては、

- (1) セン断型試験法
- (2) 曲げ型試験法
- (3) 引張型試験法

といった実部材を簡略化した方法や、実際に連続繊維シートにより補強した RC はりの曲げ載荷試験などが挙げられ、数多く行われている。しかし、実部材を簡略化した試験法の場合、付着強度が(3)<(2)<(1)と得られるなど、試験法により大きく異なる⁷⁴⁾ことが報告されており、試験法の影響を考慮する必要がある。

一方、曲げ補強として用いる連続繊維シートの定着域などセン断ずれを生ずる個所での付着性状の詳細な解明、また、かぶりの剥落防止のために適用される場合の限界状態の解明を目的とすれば、コンクリートからの引張応力の伝達とは異なる面外方向の剥離荷重が作用するため、

- (4) 剥離型試験法

を行い、付着性状を確認する必要があると考えられる。しかし、剥離強度は経験的にかなり小さいことが知られており、補強を主目的として用いる連続繊維シートについては、ほとんど研究例が見られないのが現状である。

連続繊維シートとの付着性状に与える影響には、付着長、コンクリート強度など棒材の場合にもみられた影響の他に、繊維の目付量、コンクリートの表面処理方法など、連続繊維シート特有のものが挙げられている⁷⁵⁾⁷⁶⁾⁷⁷⁾。その程度を明らかにするために、JCI⁷⁸⁾では、相対評価であるとしながらも、せん断型試験法を用いることを提案している。これは、棒部材の曲げ補強やせん断補強における、ひび割れを跨ぐときの付着状況すなわち曲げ付着を再現しようとしたものであると考えることができる。また、この試験から得られる定常状態の連続繊維シートのひずみ分布より、付着応力の分布を直線と仮定して、最大付着応力 τ_y と有効付着長 l_e を以下の式で求めることが提案されている。

$$\tau_y = \Delta \varepsilon_F E_F A_F / s_g / b \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$l_e = P_{\max} / (2\tau_y b) \quad \text{Eq. 2.8}$$

- ここに、 τ_y : 最大付着応力
 $\Delta \varepsilon_F$: 最大荷重時のひずみ増加区間での隣合うゲージひずみ値の差
 E_F, A_F : 連続繊維シートの弾性係数, 断面積
 s_g : ひずみゲージの貼付け間隔
 b : 連続繊維シートの幅
 P_{\max} : 最大荷重

この有効付着長の考え方⁷⁵⁾では、連続繊維シートは $2\tau_y \cdot l_e \cdot b$ またはその破壊荷重の小さいほう以上の引張力を発生しない。しかし、付着応力がコンクリートと連続繊維シートの間を伝わる時、コンクリートが引張を受けて隣接するひび割れが発生し、ひび割れ間隔内のみで付着応力が発生することになることから、ひび割れ間隔と有効付着長の関係を考慮する必要があるなど、課題は残されている。なお、得られた結果は、必要な定着長、破壊形式の予測に用いることができる。また、コンクリートとの付着を、従来からの手法と同様に τ - s 関係としてモデル化し、有限要素法による構造解析も行われている。

一方、連続繊維シートのようにコンクリートの表面に貼付ける材料を緊張材として用いる研究は、当初は、連続繊維シートに樹脂を含浸、硬化し板状に成形して出荷されるもの(連続繊維プレート)を用いて行われた。また、その後、現場で連続繊維シートを緊張し、樹脂を含浸、硬化させる試みもなされている⁷⁹⁾⁸⁰⁾⁸¹⁾。これらの研究では、主として曲げやせん断に対する補強効果に与える緊張力の影響を検討している。

以上のように、連続繊維シートとの付着に関して数多くの研究がなされてきているが、連続繊維シートの付着破壊は脆性的な挙動を示し、また、ばらつきも大きい

め、定量的な評価を行うのに困難が伴っている。また、曲げ付着、定着付着ともに、その長期性状に関する研究はほとんどなされていないのが現状である。

参考文献

- 1) 日本複合材料学会: 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1990.2.
- 2) 奥田 聰: プラスチックの耐食性とその試験・評価, 日刊工業新聞社, 1996.2.
- 3) 森田 健一: 炭素繊維産業, 近代編集社, 1984.
- 4) 近畿コンクリート工業 技術資料, 1990.
- 5) 特公昭 50-12484 (Dupont).
- 6) 特公昭 61-3886(帝人).
- 7) クラレ: ビニロン FRP ロッド技術資料, 1992.4.
- 8) Terry. A. M. & Bruse. C. B.: The Fracture of Glass, Science Materials, 1987.12.
- 9) 勝木 太, 魚本 健人: アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp.519-524, 1995.6.
- 10) 魚本 健人, 勝木 太: 各種繊維の耐アルカリ性の評価方法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.167-174, 1994.5.
- 11) ビニルエステル樹脂研究会: ビニルエステル樹脂, 化学工業日報社, 1993.6.
- 12) 奥田 聰: 高分子劣化・崩壊のトラブル対策と最新の改質・安定化技術総合資料集, 高分子物質研究会, 1981.5.
- 13) 北條 英光, 津田 健, 小笠 原強: 耐食 FRP 樹脂の腐食形態と腐食速度, 強化プラスチック, Vol.34, No.2, 1988.
- 14) 日本材料学会: 第 27 回高分子材料セミナー資料, 1995.11.
- 15) Weisman. Y: Moisture Effects and Moisture-induced Damage in Polymeric Composite, Composite Materials and Structures, 1988.
- 16) 藤井 善通, 井上 惇, 加藤 和彦, 伊藤 康博, 吉識 忠継, 前川 善一郎, 濱田 泰以: ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)の応力腐食に及ぼすマトリックス樹脂の影響, 材料, Vol. 43, No.492, pp.1100-1105, 1994.9.
- 17) B. D. Caddock, K. E. Evans, D. Hull: The diffusion of hydrochloric acid in polyester thermosetting resins, Jour. of Materials Science 22, pp.3368-3372, 1987.
- 18) 駒井 謙治郎, 城下 莊平, Michiel V. Bruschke: 二種類のアラミド/エポキシ複合材の引張りと疲労特性に及ぼす水の影響, 材料, Vol. 36, No.411, pp.1395-1401, 1989.12.
- 19) 駒井 謙治郎, 城下 莊平, 木下 定, J. Grenestedt: アラミド/エポキシ斜交積層複合材料の引張りと疲労特性に及ぼす水の影響, 材料, Vol. 38, No.434, pp.1329-1335, 1990.11.

- 20) 駒井 謙治郎, 箕島 弘二, 佐田 安史: ArFRP の引張と疲労における層間はく離進展特性に及ぼす水環境効果, 材料, Vol. 42, No. 475, pp.391-397, 1993.4.
- 21) 箕島 弘二: 新材料の疲労 5. FRP の疲労—水環境効果について—, 材料, Vol. 43, No. 492, pp.1174-1180, 1994.9.
- 22) 駒井 謙治郎, 箕島 弘二, 渋谷 豊茂, 野村 勉: 炭素繊維斜交積層複合材料の機械的性質と疲労に及ぼす水環境効果, 日本機械学会論文集(A編), 54巻, 505号, pp.1677-1683.
- 23) 市川 順一, 藤井 健太郎, 渡辺 敬一: 無応力状態でのアルカリ促進実験による各種 FRP ロッドの耐久性, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集, pp.222-223, 1991.9.
- 24) 渡辺 敬一, 藤井 健太郎, 田代 博海: 緊張状態でのアルカリ促進実験による各種 FRP ロッドの耐久性, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集, pp.224-225, 1991.9.
- 25) 蓮尾 孝一, 田村 富雄, 松原 澄行, 小坂 田論: 組紐状アラミド連続繊維筋の材料特性および耐久性について, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文集, pp.309-314, 1992.
- 26) 柿原 隆一, 神吉 正弥, 河崎 俊史: AFRP ロッドの耐久性, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文集, pp.305-308, 1992.
- 27) 山下, 木内ら: 新素材による PC 橋, プレストレストコンクリート, No. 2, 1989.
- 28) 渡辺 敬一: 緊張状態でのアルカリ促進実験による各種 FRP ロッドの耐久性, 土木学会第 46 回年次講演会講演論文集, 1991.9.
- 29) 岡崎 正樹, 手塚 正道: ビニロン FRP ロッドの諸性質, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集, 1992.4.
- 30) A. Gerritse: Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment, Proc. of the 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, CSCE, pp.129-137, 1992.
- 31) Corton, H. T.: Micromechanics and Fracture Behavior of Composites, Modern Composites Materials, 1967.
- 32) 芳我 攻, 小山 秀夫: Al/CFRP 多層積層ハイブリッド複合材料の AE 特性, 材料, Vol. 39, No. 445, 1990.
- 33) 若武 耕司, MYO KHIN, 猪八重 由之: コンクリート補強用 FRP ロッドの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 7 巻, 第 2 号, pp.91-102, 1996.7.
- 34) 木村 浩, 榎本 剛, 高森 潔, 高木 宏: 炭素繊維複合材ケーブルのアルカリ耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No.1, pp.525-530, 1995.6.
- 35) 久保田 敏治, 藤井 健太郎, 渡辺 敬一: 各種 FRP ロッドを緊張材とした PC 部材の

- 耐久性状, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集, pp.226-227, 1991.9.
- 36) 藤井 栄: 鉄筋コンクリートにおける付着・定着機構とその部材性能に及ぼす影響に関する研究, 京都大学博士論文, 1992.1.
- 37) 池田 尚治, 小柳 治, 角田與史雄: 鉄筋コンクリートの力学, 新体系土木工学 32, 技報堂出版, pp.143-150, 1990.
- 38) 六車 熙, 森田 司郎他: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 131 号, 第 132 号, 第 134 号, 第 139 号, それぞれ 1967.1, 2, 4, 9, それぞれ pp.1-8, 1-6, 1-8, 1-10.
- 39) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力—すべり—ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.2.
- 40) 是永 健好, 渡辺 秀義, 小林 淳: PC 鋼より線の付着実験, 大成建設技術研究所報, 第 27 号, pp.111-116, 1994.
- 41) 山田 圭一, 島 弘, 原口 華世子: 鉄筋とコンクリートの付着特性に及ぼす荷重の繰返しと時間の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.133-138, 1991.
- 42) 長滝 重義, 佐藤 良一, 鯉淵 芳伸: 異形鉄筋とコンクリートとの付着クリープ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.6, pp.553-556, 1984.
- 43) 鈴木 計夫, 大野 義照, 李 振宝, 太田 崇士: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力—すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.51-56, 1992.6.
- 44) 李 振宝, 大野 義照, 鈴木 計夫: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力—すべり関係の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.123-128, 1993.
- 45) 李 振宝, 大野 義照, 鈴木 計夫: RC はりの長期ひび割れ幅に及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.407-412, 1994.
- 46) 鈴木 計夫, 大野 義照, 李 振宝, 鍋沢 斤吾: RC 片持はりの長期たわみと付着解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.57-62, 1992.
- 47) 佐藤 良一, 氏家 勲, 湊 英一, 北条 泰秀: 長期の RC 曲げ部材における変形と付着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.63-68, 1992.
- 48) 鈴木 計夫, 大野 義照, 栗田 佳彦, 横田 聡: 持続荷重下におけるプレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.7, pp.481-484, 1985.
- 49) A.M.Neville, W.H.Dilger, J.J.Brooks: Creep of Plain & Structural Concrete, Longman Group Limited, 1983.
- 50) 小林 和夫, 藤井 學, 渡辺 明: プレストレストコンクリートの力学, 新体系土木工学

34, pp.83-97, 技報堂出版.

- 51) 渡辺 明: ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 125 号, pp.21-35, 1966.1.
- 52) 藤井 學, 荒木 毅: プレテンション用 PC 鋼材の付着性能の評価法について, セメント技術年報, XXVI, 97, pp.509-512, 1972.
- 53) 藤井 學: プレストレストコンクリート部材の定着部補強に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1971.8.
- 54) RILEM-FIP-CEB Committee: Prescription for the testing of the determination of the adhesive quality of the prestressing reinforcement, RILEM, mai-juin, No.15, 1970.
- 55) 坂 静雄, 六車 熙, 森田 司郎: ストランドの定着時の付着効果に関する実験的研究, 材料試験, 第 8 卷, 第 69 号, pp.15-24, 1959.6.
- 56) Base, G.D.: Some tests on the effect of time on transmission length in pre-tensioned concrete, Magazine of Concrete Research, 1957.8.
- 57) Ratz, E.H., M.M.Holmjansky and V.M.Kolner: The transmission of prestress to concrete by bond, Proc. of 3rd Congress of FIP, Berlin, 1958.
- 58) 金 普漢, 大野 義照, 鈴木 計夫, 若松 達史: プレテンション用緊張材として用いた異形鉄筋の定着長さ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.985-990, 1994.
- 59) Kaar, P.H., Lafraugh and M.A.Mass: Influence of concrete strength on strand transmission length, Jour. of PCI, Vol.8, No.5, 1963.10.
- 60) 岡田 清, 藤井 學, 小沢 恒雄: PC ストランドの定着長に関する研究, セメント技術年報, XVII, 86, pp.527-530, 1963.
- 61) 丸山 武彦, 伊藤 幸雄, 西山 啓伸: 異形加工した FRP ロッドの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp.777-782, 1989.
- 62) 土木学会: コンクリート標準示方書(規準編), pp.446-450, 1996.3.
- 63) 本間 雅人, 丸山 武彦, 榎本 剛, 島 弘: CFCC の付着応力-すべり関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.823-826, 1991.6.
- 64) 菅 哲治, 島 弘, 本間 雅人: 片引試験による連続繊維補強材の局部付着応力-すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.859-864, 1993.
- 65) 本間 雅人, 丸山 武彦, 榎本 剛, 島 弘: CFCC の付着応力-すべり関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第 13 卷, 第 2 号, pp.823-826, 1991.

- 66) 菅 哲治, 島 弘, 本間 雅人: 片引き試験による連続繊維補強材の局所付着応力-すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, 第 15 巻, 第 2 号, pp.859-864, 1993.
- 67) 児島 孝之, 高木 宣章, 波田 匡司, 井上 真也: 両引試験法による連続繊維棒材の付着性状の検討, 平成 8 年度関西支部年次学術講演会講演概要, V-13-1, 1996.5.
- 68) 土木学会: コンクリートの力学的特性に関する調査研究報告, コンクリートライブラリ 69, 1991.7.
- 69) 谷垣 正治, 岡本 直, 蓮尾 孝一: 繊維補強材の付着性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No.2, pp.831-836, 1991.
- 70) 蓮尾 孝一, 岡本 直, 谷垣 正治: アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その 12. 付着性状Ⅱ 両引き付着試験結果), 日本建築学会大会, pp.991-992, 1990.10.
- 71) 土木学会: 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリ 72, 1992.4..
- 72) 谷垣 正治, 岡本 直, 松原 澄行, 蓮尾 孝一: 組紐状アラミド連続繊維筋を用いた PPC 梁の長期載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.911-916, 1993.
- 73) 佐藤 和弘, 榊田 桂寛, 棚野 博之, 鹿毛 忠継: 連続繊維補強筋を用いたコンクリートはりの長期たわみ挙, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.993-998, 1993.
- 74) 堀口 敬, 佐伯 昇: コンクリートの強度が繊維シートの付着特性に与える影響, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.71-74, 日本コンクリート工学協会北海道支部, 1996.11.
- 75) 浅野 靖幸, 佐藤 靖彦, 上田 多門, 小野 定: 炭素繊維シートの付着特性について, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.75-80, 1996.11.
- 76) 篠崎 裕生, 三上 浩, 加島 清一郎, 樋口 昇: アラミド繊維シートを貼り付けて補強した RC 梁の曲げ耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1563-1568, 1997.
- 77) 岳尾 弘洋, 松下 博通, 牧角 龍憲, 長島 玄太郎: CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.
- 78) 日本コンクリート工学協会: 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(I)および(II), 1998.
- 79) 甄 曉青, 佐伯 昇, 志村 和紀, 秦 滋康: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 桁の耐力, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp.934-935, 1996.9.

- 80) 出雲 健司, 甄 曉青, 志村 和紀, 佐伯 昇: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 部材の曲げ・せん断補強効果, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.141-146, 1996.11.
- 81) 出雲 健司, 浅水 俊博, 佐伯 昇, 志村 和紀: テンションシートを用いた PRC 部材のせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1557-1562, 1997.
- 82) コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説/コンクリート床版防水工設計施工指針(案)・同解説, 阪神高速道路公団・日本材料学会, 1989.3.
- 83) 樹脂ライニング工業会: 樹脂ライニング皮膜の劣化診断指針, 1996.5.
- 84) 大石 不二夫: 高分子材料の耐久性—リサイクル時代の寿命とその予測—, K BOOKS シリーズ 99, 工業調査会, 1993.10.
- 85) 早川 淨 編・著: 高分子材料・製品の寿命予測, アイピーシー, 1997.9.
- 86) 早川 淨 編・著: 高分子材料の寿命評価・予測法, アイピーシー, 1997.9.
- 87) 中西 洋一郎, 幾田 信生: FRP における界面相とその化学的制御, 材料, Vol. 45, No. 12, pp.1307-1315, 1996.12.
- 88) Johnson, A. F.: Engineering Design Properties of GRP, British Plastics Federation, London, 1979.
- 89) 鷹合 徹也, 佐野 一仁, 福島 英二: GFRP 複合材料の低温における破壊じん性値, 材料, Vol. 38, No. 429, pp.637-643, 1990.6.
- 90) 中村 明, 志波 光晴: 強化プラスチック, Vol. 31, No. 423, 1985.
- 91) 魚本 健人, 西村 次男: FRP ロッドの引張強度と試験本数, 土木学会第 47 回年次講演会講演論文集, 1992.9.
- 92) 丸山 武彦: 炭素繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1992.3.
- 93) Nanni, A., Matsubara, S. and Hasuo, K: Durability of Braided Epoxy-Impregnated Aramid FRP Rods, Proc. of the 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, CSCE, pp.101-109, 1992.
- 94) 壹岐 直之, 清宮 理, 山田 昌郎: コンクリート応力場と打設方向が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp.503-508, 1996.
- 95) 福山 洋, 松崎 育弘, 中野 克彦: 連続繊維補強コンクリート部材のひび割れ幅評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第 15 巻, 第 2 号, pp.905-910, 1993.
- 96) 角田 与史雄: 曲げを受けるコンクリート部材のひび割れとたわみに関する研究の現状,

- 土木学会論文集, 第 384 号/V-7, pp.21-32, 1987.8.
- 97) 丹羽 義次 監修, 大津 政康 著: アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の稼動時の非破壊試験法—, 森北出版, 1988.8.
- 98) 勝山 邦久 編・著: 現場技術者のための AE 技術の応用, アイピーシー, 1994.6.

第3章 連続繊維棒材の耐アルカリ性と引張性状

1. 本章の目的

本来半永久構造物であるべきコンクリート構造物において、海水あるいは海砂等に起因する鋼材の塩化物腐食が問題となっている。近年その一対策として、高張力でかつ耐食性に優れた FRP(繊維強化プラスチック)を鋼材の代替材料として利用しようという試みがある。わが国でも FRP のコンクリート構造物への利用に関する開発研究が進められ、最近ではいくつかの実用例も報告されている¹⁾²⁾³⁾。しかし、コンクリート分野における FRP の利用はいまだ開発段階にあり、ことに長期的な耐久性状に関する詳細なデータは不足しているのが現状である⁴⁾⁵⁾。現在までに、アルカリ存在下での樹脂の加水分解等による腐食、水分あるいはアルカリ存在下での繊維—樹脂界面の化学的および物理的劣化⁶⁾、さらに繊維自身のアルカリ存在下での劣化等が報告されているが、コンクリート中という特殊な環境でプレストレストコンクリート(PC)用緊張材のように高持続荷重を受ける場合の長期的な耐久性の予測にはさらに検討が必要である。

本章ではコンクリート構造物用 FRP である連続繊維補強材を PC 用緊張材として使用する場合を想定し、特にアルカリ環境下における長期的な耐久性状についての基礎的な検討を行うものとした。

Table 3.1 Outline of Test Program

| Solution | Alkaline Solution 60℃ | | | | | Alkaline Solution 20℃ | | | | | Tap Water 20℃ | | Not Immersed |
|-----------------------------|--------------------------|----|----|--------|----|--------------------------|----|----|--------|----|------------------|----|------------------|
| | 0.65Pu | | | 0.00Pu | | 0.65Pu | | | 0.40Pu | | 0.65Pu | | |
| Tension Level | 0.65Pu | | | 0.00Pu | | 0.65Pu | | | 0.40Pu | | 0.65Pu | | Not Tensioned |
| Immersion Period (Month) | 4~5 | 10 | 14 | 10 | 14 | 5 | 10 | 14 | 10 | 14 | 10 | 14 | |
| SEM/EPMA Observation | | ○ | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | ○ |
| Tensile Test | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Flexural Test of PC Beam | ○ | | | | | ○ | | | | | | | ○ |

○: Test conditions conducted Pu: Tensile ultimate load

2. 実験概要

実験は連続繊維補強材の浸漬試験，浸漬後の観察，浸漬後の引張試験および浸漬後の連続繊維補強材を緊張材に用いた PC はりの曲げ試験からなる．これらの概要をTable 3.1に示す．

2.1 浸漬試験

現在市販されている連続繊維補強材の中から耐久性に優れているとされるものを数種選択し，PC 構造を想定して緊張，定着し，試験長(定着部を除く母材部)70～130cm の中央 30cm を，コンクリート中の細孔溶液を模擬したアルカリ溶液等に，所定の環境温度で最長 14 カ月の浸漬を行う浸漬試験を実施した．浸漬試験に際しては以下の項目を主要要因とした．

Table 3.2 Published Properties of Fiber Reinforced Plastics

| Specimen | Fiber | Resin | Shape |
|----------|----------------------|--|--------------------------------|
| Aramid-T | Aramid (Technora) | Vinyl Ester Resin (Bisphenol A, Acrylic Acid, Peroxide) | Spiral Wound Round Bar (φ6) |
| Aramid-K | Aramid (Kevlar49) | Epoxy Resin (Bisphenol A, Amide) | Braided Cable (φ8) |
| Carbon | Carbon (PAN Type) | Epoxy Resin (Novolak, Amide) | Spiral Cable (φ7.5) |

| Specimen | Fiber Content (Vol.%) | Nominal Area (mm ²) | Tensile Strength* (kN/mm ²) | Young's Modulus (kN/mm ²) | Elongation (%) |
|----------|--------------------------|------------------------------------|--|--|-------------------|
| Aramid-T | 65 | 28.3 | 1.76 | 53.9 | 3.6 |
| Aramid-K | 65 | 50.0 | 1.27 | 63.7 | 2.2 |
| Carbon | 64 | 30.4 | 1.76 | 137 | 1.6 |

* Guaranteed values by respective manufacturers.

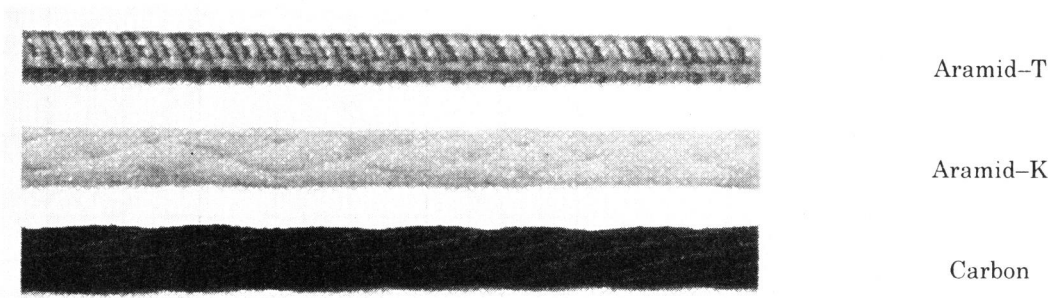


Fig. 3.1 FRP Bar

a) 連続繊維補強材

実構造物への適用が期待されているとともに、アルカリ耐久性状が比較的良いとされるアラミド繊維棒材を中心に扱った。また、比較用として力学的にはほぼ同等の2者を取り上げ、合計3種の棒材について試験を行った。用いた棒材のメーカー提示の諸性質をTable 3.2に示す。また、それぞれの外観をFig. 3.1に示す。

b) 環境溶液

環境溶液にはコンクリート中の細孔溶液を模擬した溶液として丸山⁷⁾が使用したアルカリ溶液(pH12.5~13.0, $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 2g/l, NaOH: 10g/l, KOH: 14g/l, 以下アルカリ溶液と呼ぶ)を標準溶液とし、また比較用として水道水も用いた。

c) 緊張荷重レベル

緊張荷重としては、従来よく採用されている0.65Pu(Pu: 破断荷重)を標準緊張荷重レベルとし、比較用として0.40Pu, 0.00Pu(非緊張)を設けた。

d) 環境温度

20℃, および劣化促進を目的として60℃の2種類の溶液槽を設けた。

浸漬中、主要なものについては定着部にセンターホール型ロードセルを取り付け、浸漬時における緊張荷重の経時変化を測定した。さらに代表的なものについてAEセンサー(共振型, 振動板直角方向 200kHz, 平行方向 800kHz)を1個取り付け、発生するAEイベント数を記録した。浸漬中のAE測定条件をTable 3.3に示す。

Table 3.3 Conditions of AE Measurement (1)

| Environmental Condition | Alkaline Solution 60°C | Alkaline Solution 20°C | Tap Water 20°C |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Amplifier | 40+30dB | 40+30dB | 40+20dB |
| Filter Through | 0.2~1.0MHz | 0.2~1.0MHz | 0.1~1.0MHz or 0.1~0.3MHz |
| Discriminate Level | 250mV | 150mV | 250mV |
| Dead Time | 1msec | 1msec | 1msec |

2.2 供試体の観察

浸漬期間を終えた供試体の緊張荷重を除荷し、溶液中から取り出した供試体の外観および断面を観察した。さらに、10ヶ月の浸漬を行った供試体を中心に、走査型電子顕微鏡(SEM), 電子線マイクロアナライザー(EPMA)の手法により、微視的劣化と溶液中の元素の侵入状況を観察した。

a) 試験片の作製

供試体を溶液から引き上げた後、そのまま室温で約 1 週間乾燥させた。供試体表面を乾布で拭いたあと、浸漬部分の中央付近から長さ 2~3cm の試料を 3 個切り出し、観察に用いた。研磨に際しては水を潤滑液に用い、Table 3.4 に示す工程で行った。

Table 3.4 Grind Condition

| Process | Powder | Lubricator | Time |
|-------------------------------------|--|------------|---------------------------------|
| Mechanical Grind (1) | #80(Silicon Carbide 200 μ m) #320(Silicon Carbide 200 μ m) #600(Silicon Carbide 200 μ m) | Water | 2 minutes in Two Directions |
| Mechanical Grind (2) | #1200(Silicon Carbide 200 μ m) #1500(Silicon Carbide 200 μ m) | Water | 6 minutes in Two Directions |
| Final Grind | Almina Powder (0.3 μ m) Almina Powder (0.06 μ m) | Water | 10 minutes in Two Directions |
| Vacuum Evaporation of Gold (5~10mA) | | | 8 minutes |

b) SEM および EPMA による観察

SEM により横断面を中心に観察を行った。その設定をTable 3.5に示す。また、高分子の劣化の一形態とされる高分子材内部への物質の収着状況を EPMA により観察した。撮影に使用した供試体は SEM 観察と同一のものを使用した。計測時の設定をTable 3.6に示す。なお、注目元素は、アルカリ金属である Na, K およびアルカリ土金属の Ca とした。検出される各元素の X 線強度を平面に配置し、強度によって分割着色してマッピングを行った。

Table 3.5 Conditions of SEM

| | |
|------------------|-----------------------|
| Accel Voltage | 2~7kV |
| Probe Current | 6×10^{-10} A |
| Working Distance | 10~12mm |
| Gun Bias | 3 (Manual) |

Table 3.6 Conditions of EPMA

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| Area | 4 \times 4mm |
| Number of Pixel | 200 |
| Probe Current | $2 \sim 3 \times 10^{-8}$ A |
| Dwell Time | 60msec |
| Size of Pixel | 20 μ m |

2.3 引張試験

浸漬した供試体について、引張試験を行った。試験時には供試体にひずみゲージ、AE センサを取り付け、荷重、ひずみ、AE カウント数等を計測した。

a) 試 料

試験長は、定着部の影響を避けるために浸漬区間 30cm の両端 10cm ずつの余裕をとって 50cm とした。ただしアラミド T については、浸漬時に使用した定着用鋼管スリーブが長く、母材長に余裕がないのでそのままの形状で使用するものとし、試験長は 70cm とした。定着体には鋼管のスリーブと定着用膨張材を用いた。

b) 載 荷 方 法

供試体を引張方向と供試体軸方向が一致するように定着部でチャックにより試験機に取り付け、載荷開始から破断まで一定載荷速度で載荷する単純載荷方式で載荷試験を行った。載荷速度は繊維の単位断面積あたりに加わる荷重が一律になるよう 1 分間に $A \times V_f \times (500 \pm 50) \text{N}$ (A : 公称断面積, V_f : 引張に抵抗する繊維の混入率) 程度の荷重増加の割合で載荷した。

なお、アラミド T については、単純載荷方式の他に、カイザー効果のフェリシティー比を求めるため約 10kN ごとに漸増—除荷する繰返し載荷も行った。

c) 測 定 項 目

載荷開始から破断に至るまで、荷重とひずみを計測するとともに、供試体の外観、破断面等を観察した。

AE は、計測機の性能等からリングダウン法で計測した。AE センサーは浸漬中の計測と同様のセンサーを用い、計測位置は浸漬部分中央とした。AE 測定の設定を Table 3.7 に示す。

Table 3.7 Conditions of AE Measurement (2)

| | |
|--------------------|------------|
| Amplifier | 40+30dB |
| Filter Through | 0.2~1.0MHz |
| Discriminate Level | 150mV |
| Dead Time | 1msec |

2.4 PC はりの曲げ試験

浸漬後の連続繊維補強材を用いてポストテンション PC はりを作成し、浸漬による連続繊維補強材の劣化が部材の耐荷性状に与える影響を検討した。

a) PC はり供試体

幅×高さ×全長=10×20×130cm のポストテンション PC はりを、健全な連続繊維補強材を緊張材に用いた場合に曲げに対して緊張材破断型(曲げ引張型)の破壊形式となるように設

計し、対称 2 点载荷による一方向静的曲げ試験を行った。供試体を**Fig. 3.2**に、また目標強度 40MPa のコンクリート示方配合を**Table 3.8**に示す。緊張材に使用した連続繊維補強材は、健全および緊張、浸漬後のアラミド T、アラミド K の 2 種類であり、これらを組み合わせて

Table 3.8 Mix Proportion of Concrete

| Target Strength f_{cr} (N/mm ²) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit mass (kg/m ³) | | | | WRA (cc/m ³) |
|---|----------------|---------------|------------|------------|------------|--------------------------------|-----|-----|------|-----------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G | |
| 40 | 15 | 5±1 | 3 | 56 | 42 | 175 | 315 | 740 | 1087 | 788 |

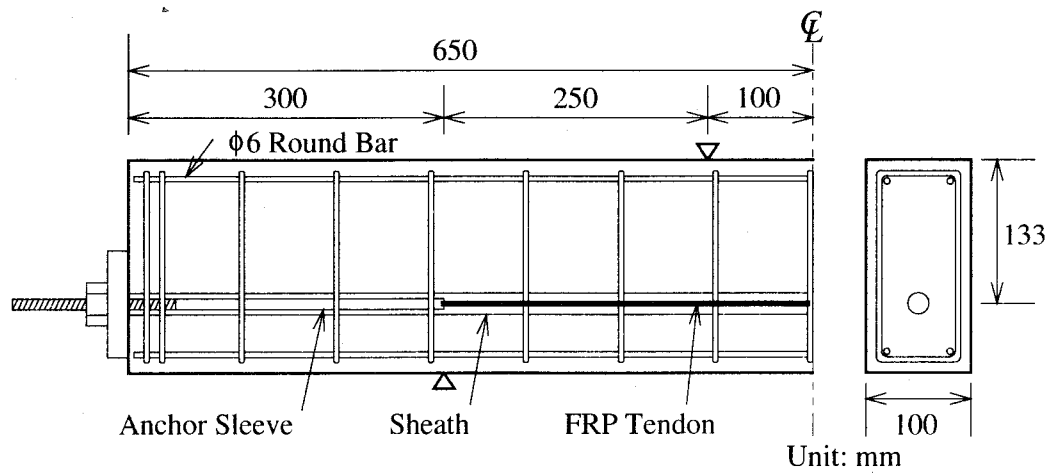


Fig. 3.2 Prestressed Concrete Beam Specimen

Table 3.9 Test Conditions of PC Beams

| Specimen | Tendon | | Prestress Level |
|----------|----------|--------------------------------|--------------------|
| T-N-1 | Aramid-T | Not Immersed/Not Tensioned | 0.65Pu (32.5kN) |
| T-N-2 | | | |
| T-2-1 | | Alkaline Sol.20°C 0.65Pu 4mon. | |
| T-6-1 | | Alkaline Sol.60°C 0.65Pu 4mon. | |
| T-6-2 | | | |
| K-N-1 | Aramid-K | Not Immersed/Not Tensioned | 0.65Pu (41.2kN) |
| K-N-2 | | | |
| K-6-1 | | Alkaline Sol.60°C 0.65Pu 4mon. | |

Table 3.10 Mechanical Properties of Concrete

| Compressive Strength (N/mm ²) | Young's Modulus (×10 ⁴ N/mm ²) | Flexural Strength (N/mm ²) | Tensile Strength (N/mm ²) |
|--|--|---|--|
| 45.2 | 3.51 | 5.77 | 2.65 |

Table 3.11 Mix Proportion of Grout

| W (kg) | C (kg) | WRA (g) |
|--------|--------|---------|
| 3.5 | 10 | 150 |

合計 8 体の PC はりを作製した。緊張，浸漬を行った連続繊維補強材は，初期緊張荷重を 0.65Pu としたもので，20℃または 60℃のアルカリ溶液中でいずれも 4～5 ヶ月間の浸漬期間を経たものを用いた。プレストレス導入用の緊張荷重は，浸漬時の初期緊張荷重と同様に健全な連続繊維補強材の破断荷重 Pu に対して 0.65 とした。連続繊維補強材の浸漬区間(30cm)がはりの曲げ性状を支配するように曲げスパンは中央部分 20cm とし，載荷区間が棒材によって支配されるよう載荷スパンは棒材の定着体部分を除いた 70cm とした。これら PC はりの一覧および載荷時の各種強度試験結果をそれぞれ**Table 3.9**，**Table 3.10**に示す。

コンクリート材令約 2 週経過後，所定の強度の発現を確認し，プレストレスを導入した。導入後直ちにグラウトし，載荷試験時までさらに約 2 週間室内で養生した。グラウトの配合を**Table 3.11**に示す。

b) 測定項目

試験時の測定項目は以下の通りである。

i) 荷重

ロードセル(容量 300kN)により測定した。

ii) たわみ

スパン中央に 1 個(容量 10mm)，両支点位置にそれぞれ 1 個(容量 5mm)の変位計を設置して測定した。スパン中央たわみは両支点の変位の平均値を差し引いて求めた。

iii) ひび割れ幅

曲げスパン(20cm)付近の緊張材高さ(d=13.3cm)において，5 連のπ型ゲージ(検長 5cm，容量 2mm)を用いて測定した。

3. 浸漬中の状況

3.1 浸漬中の荷重

緊張して浸漬した棒材の緊張荷重の経時変化の一例をリラクセーション率でFig. 3.3に示す。なお、浸漬中に破断した棒材は見られなかった。

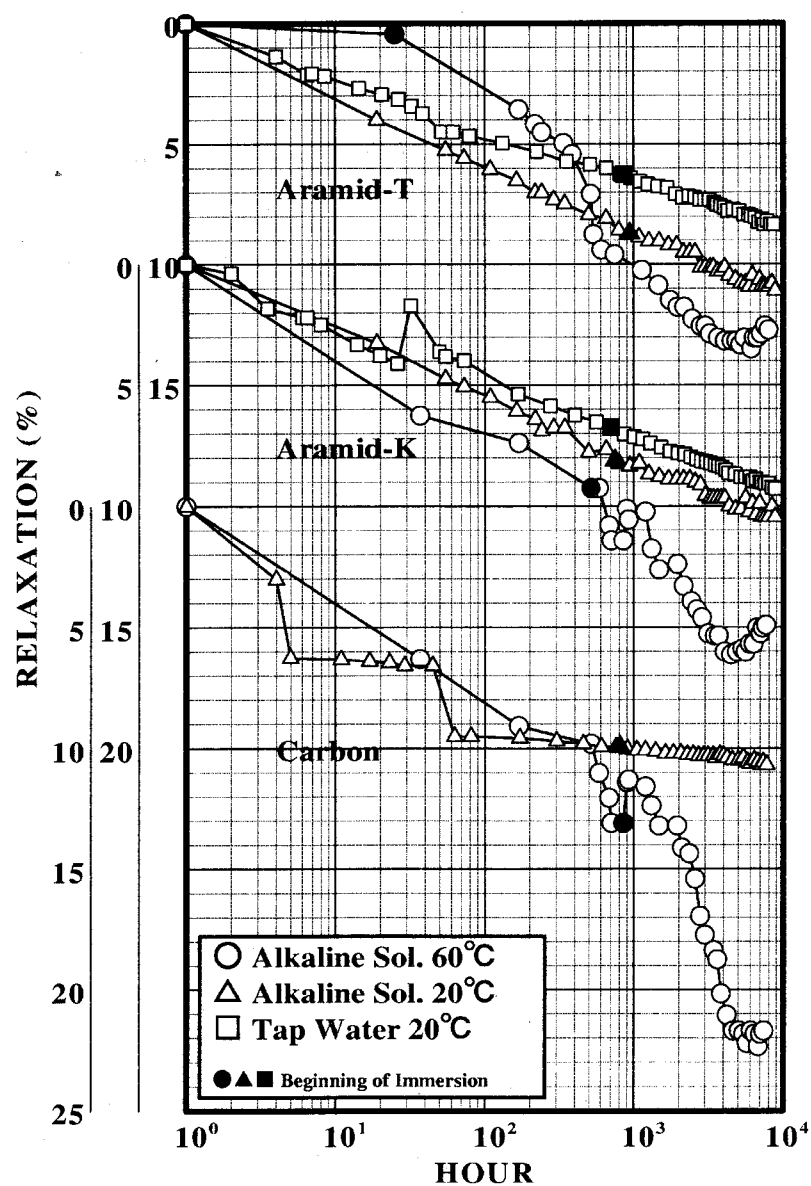


Fig. 3.3 Relaxation under Immersion (0.65Pu)

どの棒材も時間の対数に対してほぼ直線的な応力緩和を示した。しかし、60℃のアルカリ溶液に浸漬した場合、浸漬開始時(Fig. 3.3中に黒点で示す)以降に緊張荷重の低下が促進され、低下がしばらく続いた後、浸漬後約 4000 時間経過後からは荷重の低下傾向は停止し逆に若干の上昇が見られた。初期緊張時から 9000 時間までの荷重低下の度合いは、アラミド T で、60℃のアルカリ溶液に浸漬したものが約 13%、20℃のアルカリ溶液で約 11%、20℃の水道水で約 8.5%であった。

Table 3.12 Relaxation Rate under Immersion

| Environmental Conditions | | Atamid-T | Aramid-K | Carbon |
|--------------------------|--------|----------|----------|--------|
| Alkaline Sol. 60°C | 0.65Pu | 5.45 | 11.0 | 12.8 |
| Alkaline Sol. 20°C | 0.65Pu | 2.48 | 2.26 | 0.68 |
| | 0.40Pu | 1.33 | 2.03 | - |
| Tap Water 20°C | 0.65Pu | 2.03 | 2.22 | - |

Unit: %/Log(hour)

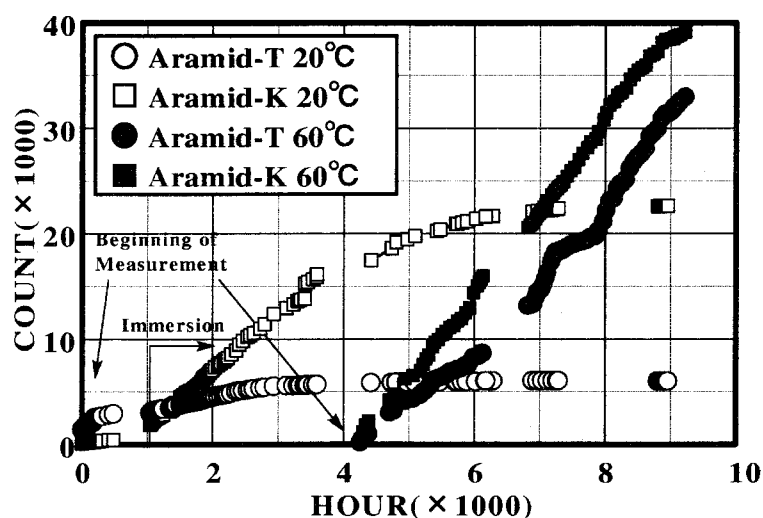


Fig. 3.4 AE Count under Alkaline Immersion (0.65Pu)

各棒材の浸漬開始時から約 3000 時間経過後までのリラクセーション曲線を直線近似し、その傾きをTable 3.12に示す。リラクセーションの進行は 60℃のアルカリ溶液中に 0.65Pu で浸漬したものが最も速く、20℃のアルカリ溶液に同じ緊張荷重で浸漬した場合に比べてリラクセーションの速度は 2 倍以上になった。なお、アラミド T およびアラミド K の場合、20℃のアルカリ溶液と 20℃の水道水とではアルカリ溶液に浸漬した方が速度は大きくなり、0.65Pu で緊張した場合 0.40Pu の場合より大きくなった。

以上より、緊張、浸漬が棒材の力学的性質に与える影響に対しては、リラクセーションが一つの目安になるものと考えられ、同一緊張荷重レベルでは 60℃のアルカリ溶液に浸漬したものが最も大きく、続いて 20℃のアルカリ溶液、20℃の水道水となり、荷重が小さな場合は影響が小さくなるものと推定される。

3.2 浸漬中の AE

緊張浸漬中の AE を測定した結果を Fig. 3.4 に示す。AE の発生は、程度の差はあるものの棒材定着時から認められたが、しばらくして発生頻度は低下した。その後、浸漬を開始すると発生頻度は再度増加し、特にアラミド K では増加の程度が大きかった。その後、20℃では時間が経過するにつれて発生頻度は次第に減少したが、60℃のアルカリ溶液では測定を開始した初期緊張後約 4000 時間から浸漬終了時の約 9000 時間までは発生頻度が低下する傾向はなく、ほぼ一定の頻度での発生がみられた。

浸漬開始時以降の AE の発生頻度の増加から、AE 発生を伴う内部微小破壊の原因の一つには、環境溶液の浸入の影響があるものと推定される。また浸漬中の AE の発生状況から、60℃のアルカリ溶液に浸漬する方が 20℃のアルカリ溶液に浸漬するよりも溶液浸入およびそれに続く内部の微小破壊の速度は速く、温度による促進効果があったものと考えられる。

4. 表面および断面の観察

樹脂の溶出や断面内のき裂の有無、および環境剤としてのアルカリ溶液に含まれる元素の断面内分布等を調べた結果、今回使用した棒材の劣化の形態には、環境剤が棒材内部にある程度侵入し内部に劣化層が形成される形のもので、内部への環境剤の侵入は少なく棒材表面から樹脂が溶出し繊維同士の結合がなくなり棒材の断面が減肉してゆく形のものが見られた。

4.1 内部への侵入

浸漬後のアラミド T 棒材の横断面 (Fig. 3.5) には繊維—樹脂界面の剥離が一部の箇所で見え、それらは棒材外周に並行して連続し、大きなき裂 (Fig. 3.6) として存在していた。EPMA によって環境剤の分布を調べた結果、K と Na はともに内部まで侵入する傾向を示し、K がより内部まで分布していた。一方 Ca は表面部だけに分布していた。したがって、環境剤の侵入については、以後 K で代表させることとする。60℃アルカリ溶液に 0.65Pu で約 9000 時間浸漬した棒材断面の K の分布を Fig. 3.7 に示す。ある程度内部にまで K の分布がみられ、特に大きなき裂の周囲約 500 μ m 幅には集中した分布が見られる。今回の計測では切断した断

面を水を潤滑液として研磨，洗浄を行ったことから，EPMA によって検出された環境剤の元素は化学的な結合等のかかなり強い力によって結合している元素であると思われる．すなわち，単にき裂を経由したものでなく，樹脂などの変質や腐食反応との関係が強いものと考えられる．さらに，緊張荷重レベルが高くなるほど，き裂の存在は棒材のより内部に広がる傾向があり，環境剤分布の傾向もより内部におよんでいた．

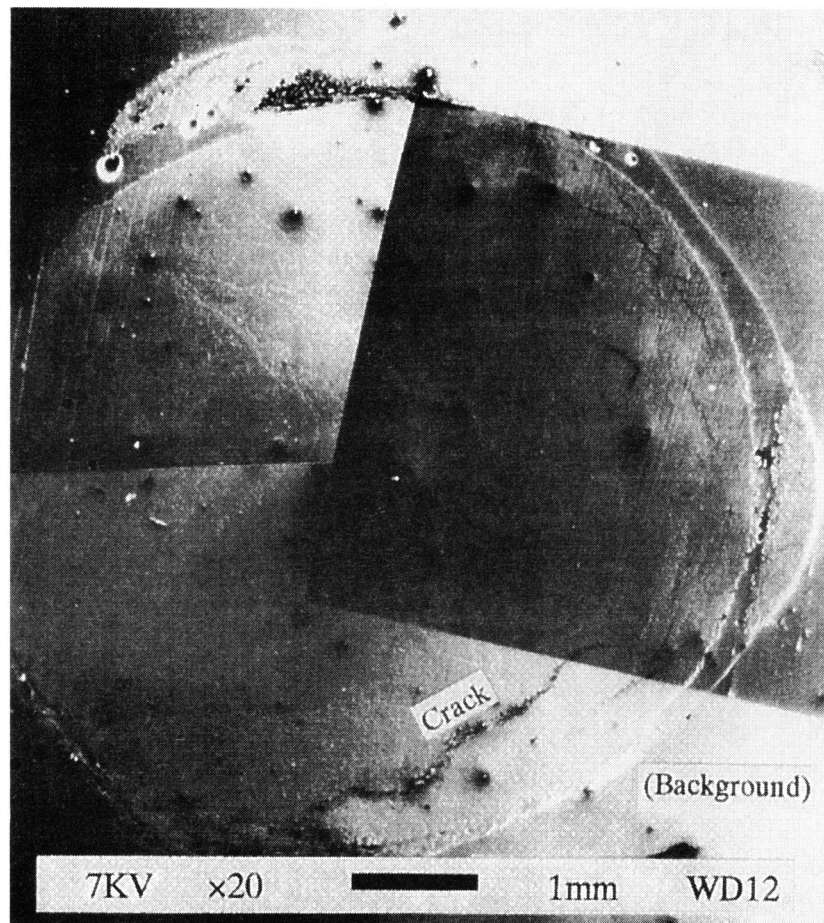


Fig. 3.5 Example of Section of Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

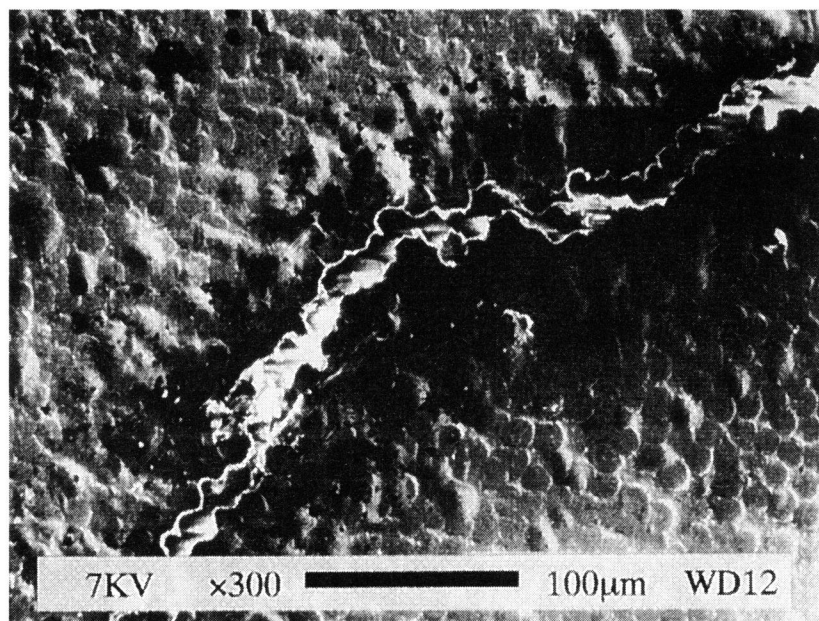


Fig. 3.6 Crack in Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

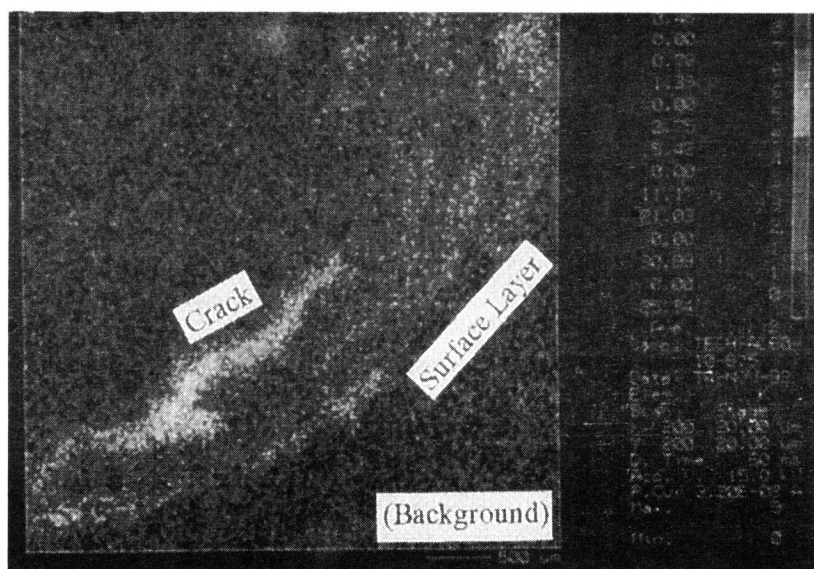


Fig. 3.7 Distribution of Potassium (K) in Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

4.2 表面からの樹脂溶出

アラミド K 棒材、炭素棒材の横断面をそれぞれ**Fig. 3.8**, **Fig. 3.9**に示す。また、0.65Puで緊張、浸漬したアラミド K 棒材の同じ断面上の K 分布を**Fig. 3.10**に示す。炭素棒材では K はほとんど検出されなかった。これらより、両棒材では、緊張荷重レベルによらず、棒材本体内部への環境剤の浸入は少なく、棒材表面からの樹脂溶出による腐食傾向が強いと考えられる。特に炭素棒材の樹脂溶出は著しく、約 9000 時間の浸漬では表面の異形加工部分が脱落し、局所的には溶出が棒材本体に達している箇所も見られた(**Fig. 3.11**)。樹脂溶出により接着を失った巻き付け繊維は非常にもろく、乾布で付着物を拭き取る際に、表面異形加工の巻き付け繊維は、多くはがれ落ちた。またアラミド K 棒材は緊張荷重レベルが高いほど表面からの腐食が軽減される傾向にあった。これは棒材が組み紐構造であることから荷重によって棒材が絞られ繊維間の距離が縮まる絞込み効果のためではないかと考えられる。

4.3 アラミド繊維棒材での劣化の進行

アラミド T 棒材は、繊維自体アルカリに対して優れた耐久性があるとされ、環境剤の侵入によってある程度繊維自体がアルカリ分と接触しても棒材の強度が大きく低下するような腐食には至りにくいと思われるが、**Fig. 3.6**に見られたような棒材内の局所的なき裂や腐食が実使用状態でどのような影響を与えるのか検討する必要がある。

アラミド K 棒材は繊維自体アルカリ環境中では若干の問題があるとされる⁸⁾ため、繊維自体がアルカリ分に接触することは避けなければならない。今回の浸漬では環境剤の侵入はごく表面に留まっているものの、今後表面からの腐食がさらに進行したり、表面のピンホールから局所的な侵入があったりすることがあれば棒材の耐力自体が低下するような劣化に結びつく可能性もあると思われ、さらに検討が必要である。

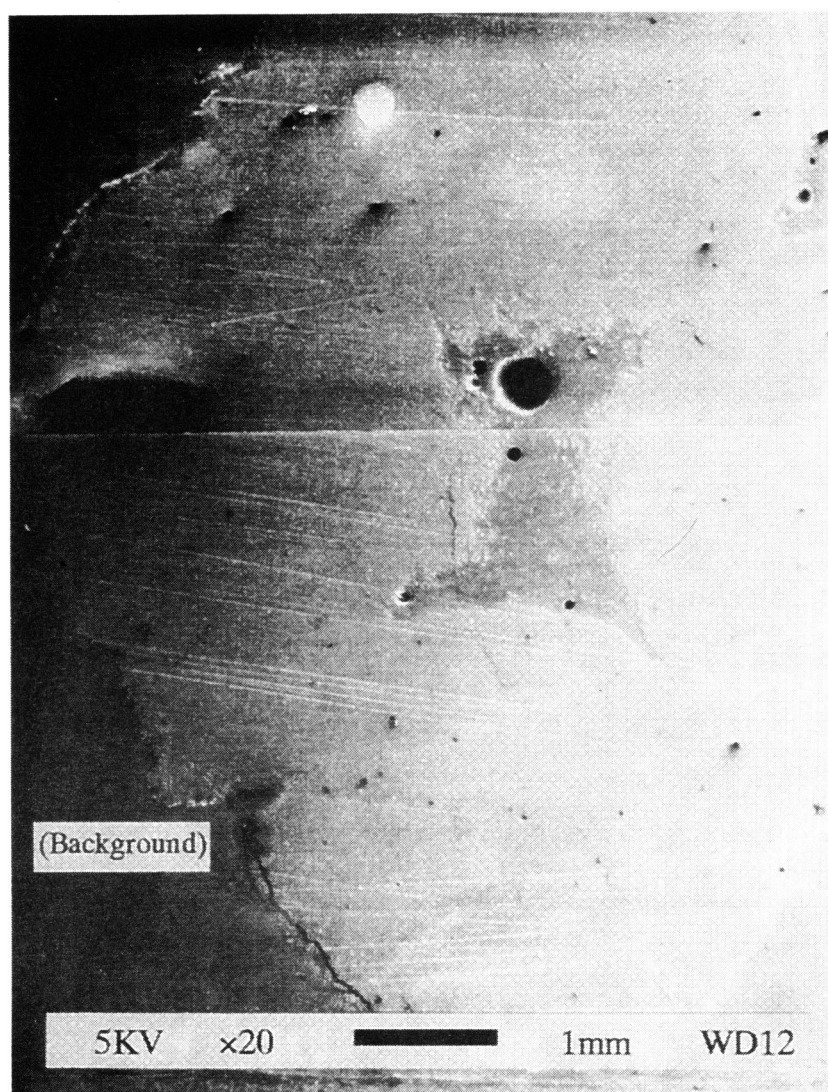


Fig. 3.8 Example of Section of Aramid-K (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

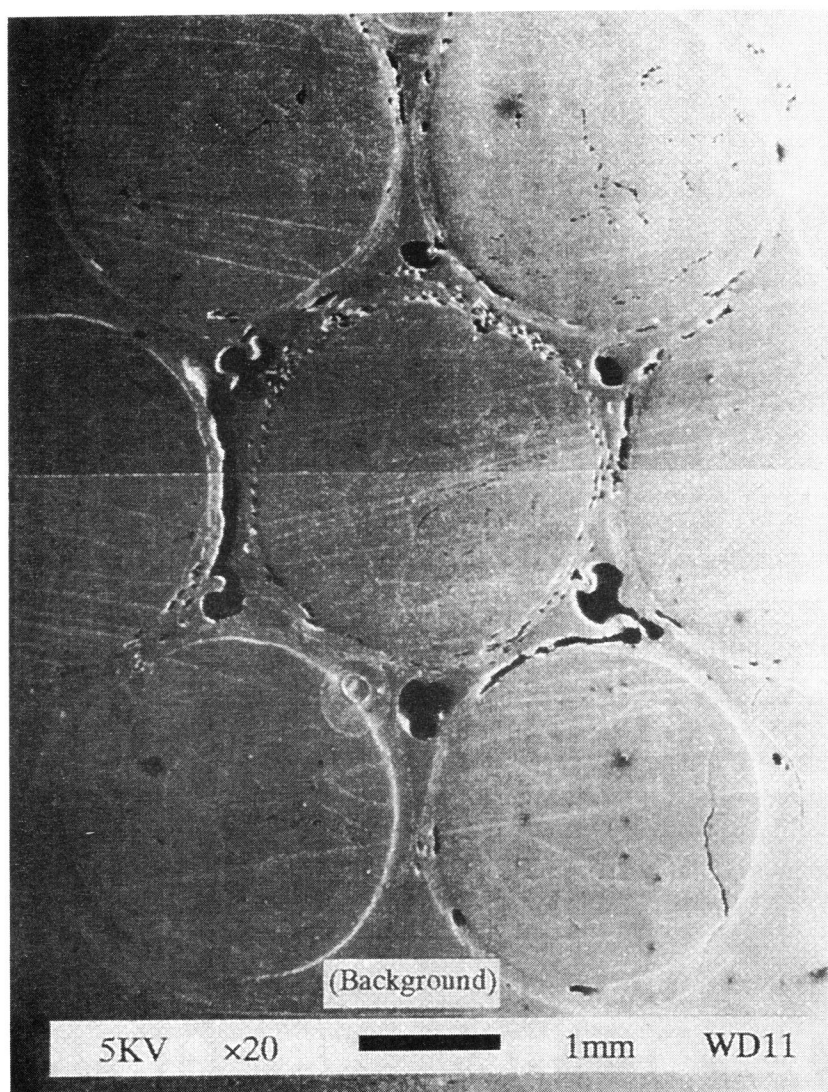


Fig. 3.9 Example of Section of Carbon (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

Table 3.13 Results of Tensile Test

| Environmental Condition | | | | |
|----------------------------|---------------|-----------------------------|---|--|
| Solution | Tension Level | Immersion Period (Month) | Tensile Strength (kN/mm ²) | Young's Modulus (kN/mm ²) |
| Aramid–T | | | | |
| Not Immersed/Not Tensioned | | | 1.96 (1.00) | 55.1 (1.00) |
| Tap Water 20°C | 0.65Pu | 10 | 1.91 (0.97) | 54.1 (0.98) |
| | | 14 | 1.96 (1.00) | 56.7 (1.03) |
| Alkaline Sol. 20°C | 0.40Pu | 10 | 1.79 (0.91) | 46.5 (0.84) |
| | | 14 | – | – |
| | 0.65Pu | 5 | 1.92 (0.98) | 57.0 (1.03) |
| | | 10 | 1.94 (0.99) | 58.5 (1.06) |
| | | 14 | 1.89 (0.96) | 40.2 (0.73) |
| Alkaline Sol. 60°C | 0.00Pu | 10 | 1.88 (0.96) | 47.1 (0.85) |
| | | 14 | 1.93 (0.98) | 45.6 (0.83) |
| | 0.65Pu | 4~5 | 1.80 (0.92) | 53.3 (0.97) |
| | | 10 | 1.85 (0.94) | 61.3 (1.11) |
| | | 14 | – | – |
| Aramid–K | | | | |
| Not Immersed/Not Tensioned | | | 1.41 (1.00) | 64.3 (1.00) |
| Tap Water 20°C | 0.65Pu | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.43 (1.01) | 62.7 (0.98) |
| Alkaline Sol. 20°C | 0.40Pu | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.44 (1.02) | 63.0 (0.98) |
| | 0.65Pu | 5 | – | – |
| | | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.53 (1.09) | 64.7 (1.01) |
| Alkaline Sol. 60°C | 0.00Pu | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.26 (0.89) | 72.2 (1.12) |
| | 0.65Pu | 4~5 | 1.44 (1.02) | 62.7 (0.98) |
| | | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.37 (0.97) | 68.5 (1.07) |
| Carbon | | | | |
| Not Immersed/Not Tensioned | | | 1.97 (1.00) | 154.5 (1.00) |
| Tap Water 20°C | 0.65Pu | 10 | – | – |
| | | 14 | 2.10 (1.07) | 136.7 (0.88) |
| Alkaline Sol. 20°C | 0.40Pu | 10 | – | – |
| | | 14 | – | – |
| | 0.65Pu | 5 | – | – |
| | | 10 | – | – |
| | | 14 | 2.00 (1.15) | 151.2 (0.98) |
| Alkaline Sol. 60°C | 0.00Pu | 10 | 1.86 (0.94) | 114.4 (0.74) |
| | | 14 | 1.81 (0.92) | 126.1 (0.82) |
| | 0.65Pu | 4~5 | 1.94 (0.98) | 128.0 (0.83) |
| | | 10 | – | – |
| | | 14 | 1.92 (0.97) | 127.3 (0.82) |

(): Ratio to the specimen without immersion/tensioning

5. 引張試験

5.1 アラミド T

a) 引張試験結果

一軸引張試験を行った結果をTable 3.13に示す。供試体数が少ないため、定量的な評価は困難ではあるものの、破断強度が大きく低下したものはなかった。なお、若干ながら破断強度が浸漬も緊張も行わなかった棒材(以下、健全棒材と呼ぶ)、20℃のアルカリ溶液 0.65Pu, 60℃のアルカリ溶液 0.00Pu, 60℃のアルカリ溶液 0.65Pu の順に低下する傾向が見られた。しかし、全てのアラミド T 棒材中でメーカー提示の保証強度を下回るものはなかった。

応力—ひずみ関係が直線とみなせるようになる荷重から破断荷重の 65%前後までの間で求めた弾性係数では、若干の違いが認められた。健全な棒材に比べ緊張および浸漬した棒材のそれは高くなり、緊張せず浸漬したものでは逆に低くなる傾向が現れた。Table 3.13に示すように、60℃のアルカリ溶液に 0.65Pu で 10 カ月間浸漬したものが最高で健全棒材の弾性係数の 11%増、逆に 60℃のアルカリ溶液に緊張無しで 14 カ月間浸漬したものは、17%減であった。このように、棒材全体としては、浸漬により弾性係数は低下する一方、その低下の程度にもよるが、緊張により増大する傾向があると考えられる。

b) AE の測定結果

引張試験時に発生した AE のイベント数の一例をFig. 3.12に示す。健全な棒材と 60℃のアルカリ溶液に 0.65Pu で約 9000 時間浸漬した棒材の両者に対して 9.8kN ごとの漸増繰返し引張試験を行いカイザー効果の発現性状を調べたところ、Fig. 3.13に示すように、健全な棒材の場合比較的荷重の低い段階ではカイザー効果の発現は明確でフェリシティー比も内部安定性の目安である 0.95⁹⁾を上回る。その後繰返し荷重の増加に伴ってカイザー効果の発現は鈍くなり破断荷重の約 70%付近ではフェリシティー比も 0.95 を下回るようになった。これに対し、60℃アルカリ溶液に 0.65Pu で浸漬したものは荷重の低い段階からカイザー効果の発現は不明確でフェリシティー比も低く、さらに荷重の増加に伴って低下したことから、浸漬によって棒材内部には不安定な箇所が生じたものと思われる。

AE 振幅および継続時間による相対的なエネルギーカウント値(1V×1V×1ms を 1 カウントとした)を算定したものを、Fig. 3.14に示す。健全なアラミド T の場合、AE 発生の初期からかなり大きなエネルギーカウントをもつ AE も発生し、破断荷重の約 30%付近から破断まではほぼ同様の傾向のエネルギー分布で AE の発生が続いた。一方、60℃のアルカリ溶液に 0.65Pu で浸漬した棒材では、載荷直後から AE が発生するものの、それらの大部分はエネルギーカウント値の小さいものであった。このことから、カイザー効果の発現を鈍らせる棒材内部の不安定な箇所は、棒材の強度に影響するような荷重負担部分の大きいものではなく、

表面加工部や劣化した樹脂あるいは界面の損傷部であると思われる。先行して受けた緊張荷重を越えても破断直前に至るまではやはりエネルギーカウンターの低い AE がほとんどで、エネルギーカウンターの高い AE は破断直前に集中した。

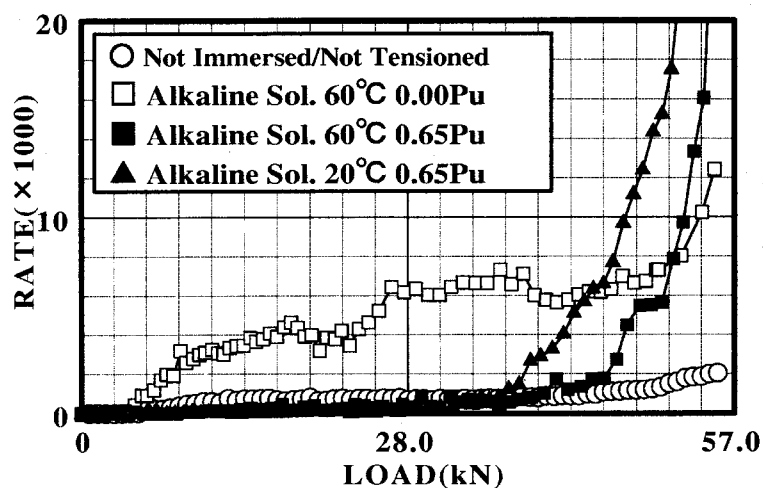


Fig. 3.12 Example of Count Rate of AE (Aramid-T)

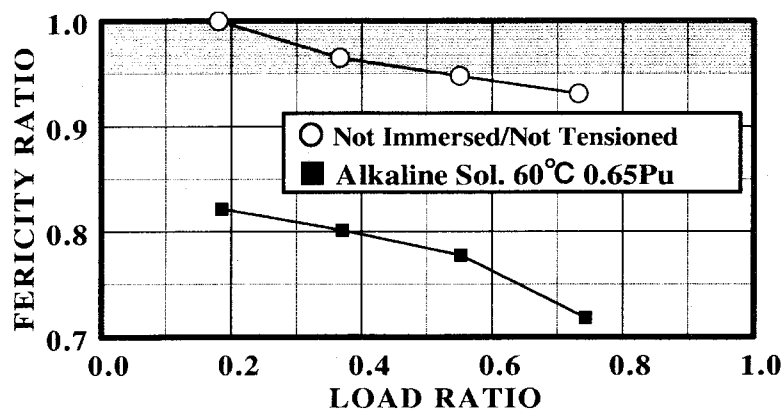


Fig. 3.13 Fericity Ratio (Aramid-T)

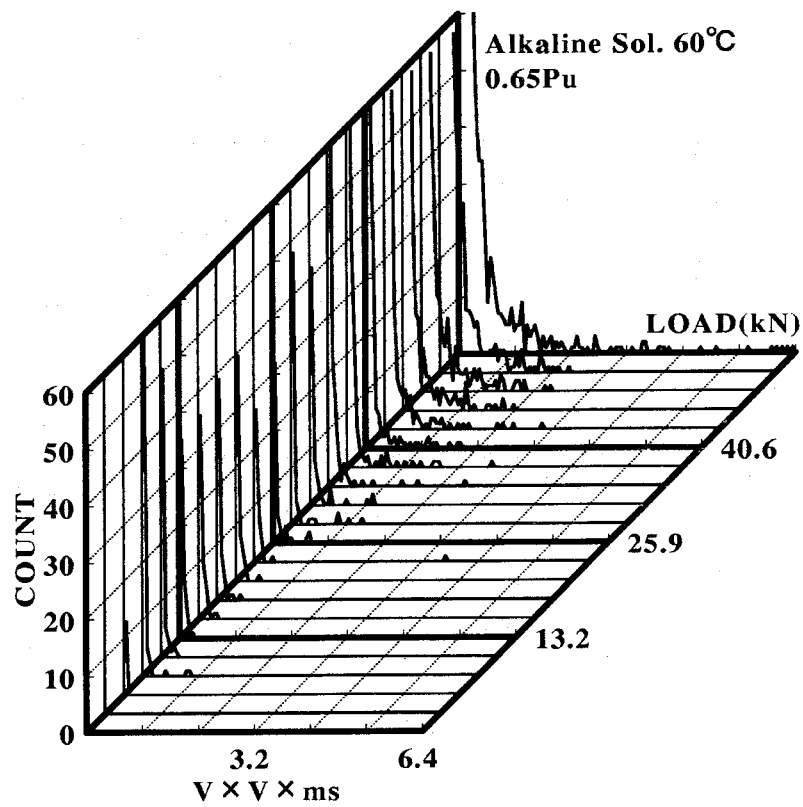
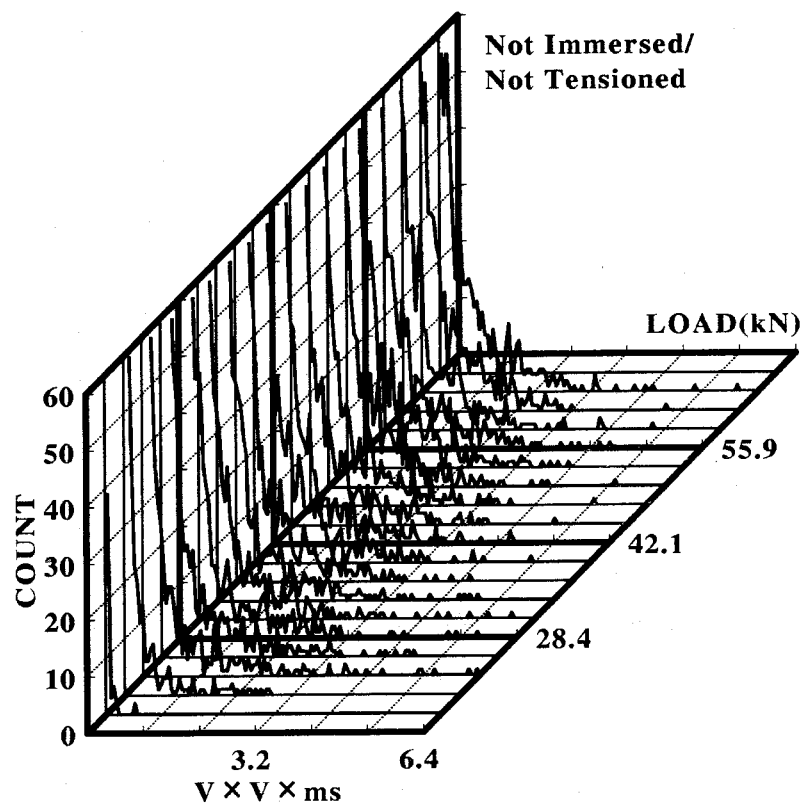


Fig. 3.14 Relative Energy Count (Aramid-T)

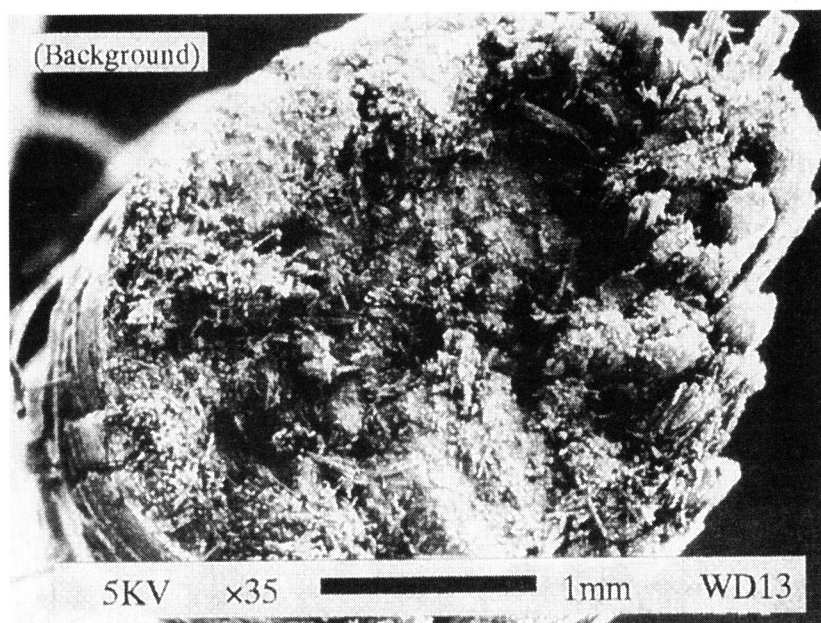


Fig. 3.15 Fracture Surface of Carbon (Not Immersed/Not Tensioned)

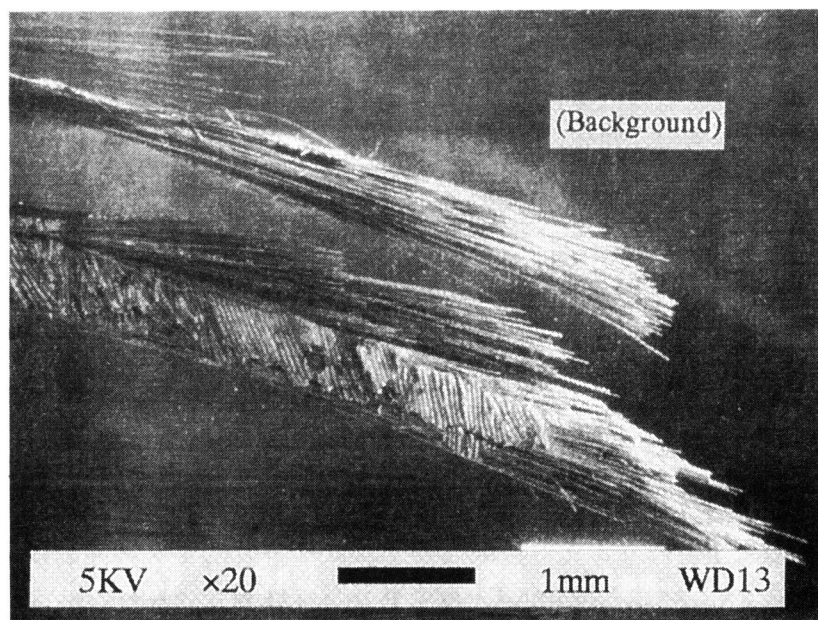


Fig. 3.16 Fracture Surface of Carbon (Alkaline Sol. 60°C 0.00Pu)

以上の結果を総合すると、緊張および浸漬によって、短期では棒材の弾性係数は増加し安定した引張応答を示すようになるが、さらに長期の浸漬を受けると、棒材内部に断面観察からも推定されるような不安定な箇所が生じるようになったと推定される。ただし、これは棒材の引張強度そのものを大きく低下させることのない程度のものである。

5.2 炭素およびアラミド K

表面から樹脂溶出が認められた炭素棒材は、棒材によっては引張強度や弾性係数の低下がみとめられた。しかし、全ての炭素棒材中でメーカー提示の保証強度を下回るものはなかった。破断の状況については、健全な場合、**Fig. 3.15**に示すように、繊維—樹脂界面の結合が強いために破壊は比較的一断面に集中し、破断面は繊維の引き抜きの少ない面を形成しが、浸漬の後では、**Fig. 3.16**に見られるように、表層部の巻き付け繊維の劣化により軸方向繊維の拘束効果が減少したためか、繊維の引き抜きの多い破断を呈し、損傷は広い範囲に広がるようになった。

アラミド K 棒材についても同様の傾向がみられるが、今回の浸漬範囲では溶出程度も小さく機械的特性の変化も少なかった。緊張荷重が大きいほど樹脂溶出の傾向は小さく、引張強度等の特性変化ともよく対応した。

6. PC はりの曲げ試験

6.1 ひび割れ性状

アラミド T およびアラミド K を緊張材に用いた PC はりの曲げ試験を行ったところ、**Table 3.14**に示すように、それぞれの環境下で劣化させた棒材を用いた場合のひび割れ発生荷重は若干ながら上昇する傾向が認められた。ひび割れ発生荷重には緊張材の弾性係数の影響があることから、増加した弾性係数が若干の影響を与えたものと考えられる。

アラミド T 棒材を緊張材に用いた PC はりの、荷重とひび割れ幅の関係を**Fig. 3.17**に示す。健全な棒材を使用した PC はりと比べ、60℃のアルカリ溶液に4ヶ月間緊張、浸漬した棒材を使用したはりでは、ひび割れが数カ所に限定され、ひび割れ分散性が低下していることが認めらる。このことは、**Fig. 3.18**に示すように、荷重と5つの型ゲージから得られるひび割れ幅の平均値および最大のひび割れ幅の関係において、ひび割れの集中により最大値が大きくなり、同じ平均ひび割れ幅のときのそれぞれの値の差が大きいことから伺える。これらは棒材の付着強度が低下したことが原因で現れたものと考えられる。

アラミド K を用いた PC はりでも、**Fig. 3.19**に示すように、アラミド T と同様、付着強度

の低下が原因と思われるひび割れ分散性の低下がみとめられた。

Table 3.14 Results of Beam Test

| Specimen | Cracking Load (kN) | Maximum Load (kN) | Displacement at Maximum Load (mm) | Failure Mode |
|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------|
| T-N-1 T-N-2 | 41.7 (1.00) | 110.7 (1.00) [91.8] | 7.54 (1.00) | I |
| T-2-1 | 42.1 (1.01) | 105.4 (0.95) [91.1] | 6.10 (0.81) | I |
| T-6-1 | 44.4 (1.06) | 96.7 (0.87) [89.0] | 3.19 (0.42) | II |
| T-6-2 | 46.3 (1.11) | 102.6 (0.93) [89.0] | 4.20 (0.56) | II |
| K-N-1 K-N-2 | 55.0 (1.00) | 126.2 (1.00) [106.2] | 5.33 (1.00) | I |
| K-6-1 | 56.7 (1.03) | 130.2 (1.03) [106.9] | 5.63 (1.05) | I |

(): Ratio to the specimen without immersion/tensioning. []: Calculated value

Failure Mode: I: Flexural Tensile, II: Flexural Compressive

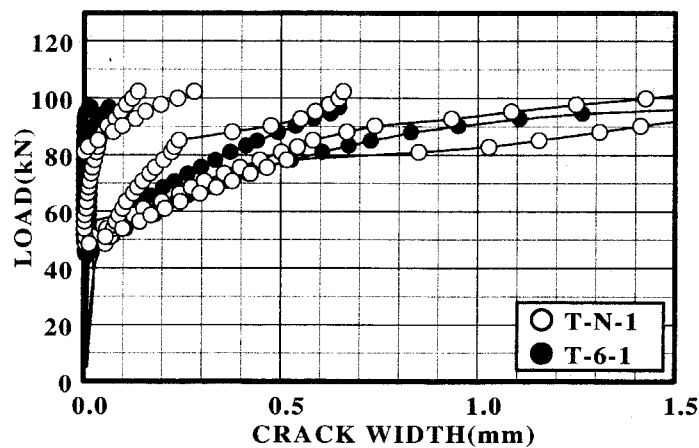


Fig. 3.17 Crack Width (Aramid-T)

6.2 最大耐力および破壊性状

Table 3.14に示したように、アラミドTを用いたPCはりのうち、60℃アルカリ溶液中で浸漬したものを緊張材とするはりは、圧縮縁のコンクリートの若干の圧潰を伴いながら最終

的には緊張材の破断により終局となる曲げ圧縮型の破壊形式を呈した。アラミド T を用いたその他の PC はりおよびアラミド K を用いたものについては、いずれも緊張材破断が先行する曲げ引張破壊型となった。劣化させた棒材は弾性係数が大きくなっているものと推定され、同じ緊張材のひずみに対して負担応力が大きくなるのが原因で、断面のバランス上圧縮縁のコンクリートに作用する応力も大きくなるため、曲げ圧縮型の破壊形式へ移行したものと考えられる。

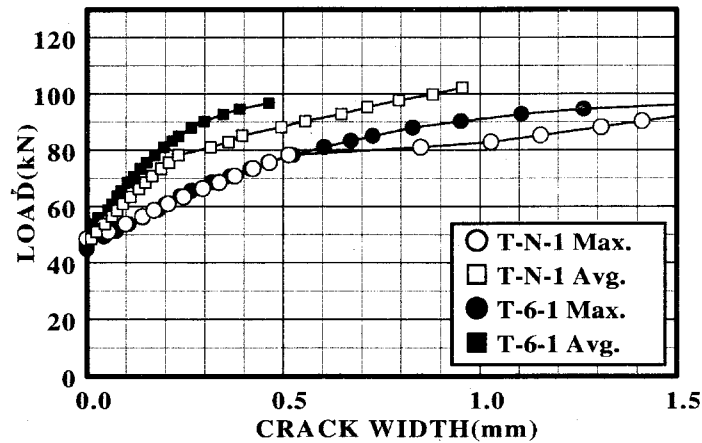


Fig. 3.18 Maximum and Averaged Crack Width (Aramid-T)

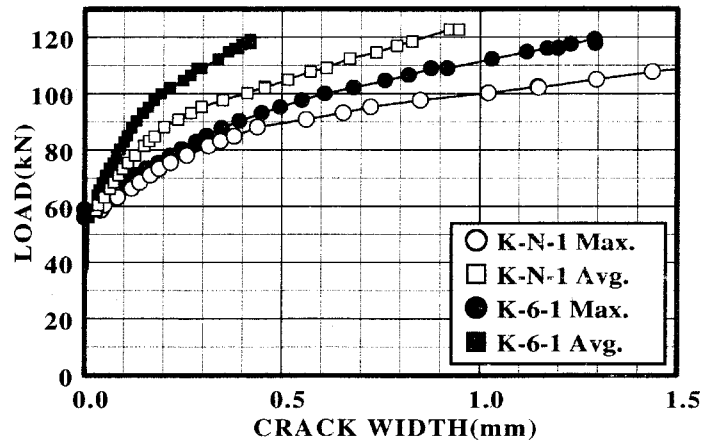


Fig. 3.19 Maximum and Averaged Crack Width (Aramid-K)

耐力については、浸漬したアラミド T を用いて作成したはりで、健全な棒材を使用したはりに比べ、大きいもので 10kN(約 10%)程度の低下を示したものもあった。また、最大耐力時のたわみにも減少がみられた。

耐力やたわみについては、破壊形式とも関するため一概に緊張材の引張性状の影響を論ずる

ことはできないが、劣化した棒材の試験を、はりなどの実使用に近い状態で行った場合、単純引張試験時には現れ難かったような現象による影響が部材の挙動に現れるものと考えられる。すなわち、荷重の一部を連続繊維補強材表面の付着によって伝達させるような載荷状態で、マトリクス樹脂の働きによる応力伝達が要求される割合が増加すること、あるいは、はりの軸筋に用いる場合のように、若干の曲げが加わる状態になること等は、はりの挙動に種々の影響を与えるものと考えられる。

7. 本章のまとめ

今回の実験において用いた全ての連続繊維補強材について、9000 時間程度までの緊張および浸漬を行った結果、引張強度等の力学特性の顕著な低下は認められず、コンクリート中よりも厳しい促進劣化環境であることを考慮すれば、ほぼ良好な耐久性状が確認された。しかし同時に、現在の時点では力学特性に顕著には現れないものの、性能低下につながる可能性のある内部組織の変化もまた認められた。

内部組織の変化は、主として繊維とマトリクス樹脂の界面に生じるき裂として生じた。このことは、連続繊維補強材が FRP の一種であり、繊維のみあるいはマトリクス樹脂のみの劣化過程をそれぞれ単独に検討することでは、連続繊維補強材の耐久性を考えるうえで不十分であることを意味している。

以下に、本章の範囲内で得られた主要な結果を要約して示す。

- (1) アルカリ溶液は水道水に比べて劣化に与える影響が大きい。アルカリ金属である K と Na は連続繊維補強材の内部に浸入する際、類似した挙動を示し、K の方が浸入傾向が強い。これに対し、アルカリ土金属である Ca は、表面付近や大きなき裂が存在するところにのみ集中して存在し、他の 2 つのイオンに比べて連続繊維補強材の内部に浸入する傾向は弱い。
- (2) 環境温度 60℃では、20℃と同種の形態で劣化が促進され、促進温度として有用である。
- (3) 平行繊維を束ねたアラミド T 棒材の場合、緊張荷重がなければアルカリ溶液の浸入は表面近くに留まり、き裂も表面近くのみが発生する。これに対し、緊張されている場合、アルカリ溶液の浸入はより内部にまで達し、き裂も同様により内部に進む傾向にある。引張性状については繊維自体の高い耐久性と繊維配向の良さから安定した性状を示すが、部材レベルでは課題を残している。
- (4) 炭素については表面層の劣化に留まっているが、表層樹脂や巻き付け繊維の劣化が棒材の機械的性質の低下として現れるものと考えられる。アラミド K 棒材についても浸入傾向は低く、組紐形状による利点も見られるが、繊維自体の強アルカリ下での耐久性に若

干の問題があるとされるため、今後に課題を残している。

- (5) 連続繊維補強材の単純な引張強度はあまり低下しない場合でも、連続繊維補強材の性能低下の影響が部材性能に現れる場合がある。

参考文献

- 1) 小林 一輔: 新素材とコンクリート, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.17-28, 1990.8.
- 2) 平賀 寿雄: 『なぜFRPを使うか』コンクリート補強用格子状複合材料, 強化プラスチック, Vol.34, No.6, pp.207-215, 1988.6.
- 3) 六郷 恵哲, 真嶋 光保: コンクリート構造物への新しい繊維系補強材の利用, 材料, Vol.41, No.471, pp.1817-1822, 1992.12.
- 4) 土木学会: 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリ 72, 1992.4.
- 5) 日本建築学会 連続繊維複合材料研究委員会: 新補強材のコンクリート構造物への利用の現状と問題, 1989.3.
- 6) 例えば, Weitsman, Y.: Moisture Effects and Moisture-induced Damage in Polymeric Composite, Composite Materials and Structures, pp.111-120, 1988.
- 7) 丸山 武彦: 炭素 繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1991.3.
- 8) 岩本 勲, 阿河 俊夫, 打田 靖夫, 吉川 太: コンクリート補強用繊維の基本特性, 土木学会関西支部年次学術講演概要集, 1989.5.
- 9) Corton, H.T.: Micromechanics and Fracture Behavior of Composites, Modern Composites Materials, pp.27-105, 1967.
- 10) 奥田 聰: 高分子劣化・崩壊のトラブル対策と最新の改質・安定化技術総合資料集, 高分子物質研究会, 1981.5.
- 11) 北條 英光, 津田 健, 小笠 原強: 耐食 FRP 樹脂の腐食形態と腐食速度, 強化プラスチック, Vol.34, No.2, pp.49-54, 1988.2.
- 12) Hull, D. (宮入 裕夫, 池上 浩三, 金原 勲 訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
- 13) Polymers-in-Concrete 委員会: 食品工場における塗り床の施工技術と現状, 日本工業技術振興会, 1992.9.
- 14) 魚本 健人, 西村 次男: プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性, 生産研究, Vol.42, No.5, pp.290-293, 1990.5.

第4章 連続繊維棒材の耐アルカリ性とコンクリートとの付着性状

1. 本章の目的

連続繊維棒材をコンクリート補強用の鉄筋や PC 鋼材の代替的な用途に供する場合、構造物・部材レベルでの安全性・使用性に関する基本的な性能である耐力、剛性、疲労強度に応じて、設計時に材料レベルとして考慮される最も基本的な性能は、引張強度、引張剛性、伸びの 3 種類である。そのほか、必要に応じて、リラクセーションやクリープ、付着強度、熱膨張係数や、せん断・圧縮強度も考慮される場合もある。これらの性能には、種々の環境下において、対象構造物の供用期間にわたる耐久性も必要である。連続繊維棒材については、要求される初期性能の大小に対して直ちに材料選定が可能となるまでデータが得られているものもあるが、適用環境下における性能の経時変化が明らかなものは少なく、合理的な設計のために更なるデータ蓄積が必要となっている。

連続繊維棒材は、鋼材のような形態での早期腐食を生じない点で鋼材より耐久性が高い。しかし、コンクリート中に埋設する連続繊維棒材においては、環境作用としてコンクリートが有するアルカリを考慮する必要がある。この環境が、緊張または非緊張状態で使用される連続繊維棒材の性能に与える影響に関する既往の研究では、それ自身を、あるいはコンクリート中に埋設した状態で高温のアルカリ溶液に浸漬するなどの促進試験により検討されている。引張性能については、アラミド繊維や炭素繊維を用いたものでも、60℃のアルカリ溶液への浸漬で引張強度、弾性係数やリラクセーションが影響を受けること¹⁾、一方、実環境ではその程度は小さく供用期間中で十分に耐久的と予測した報告²⁾などがある。

これらの繊維は比較的高い耐アルカリ性を有している³⁾と考えられるため、引張性能の経時変化については繊維結合材に用いる樹脂の耐アルカリ性を併せて明らかにする必要がある。一方、コンクリートとの付着を期待する場合、表面に樹脂層を有するため、樹脂の耐アルカリ性が付着性能に与える影響が大きいと考えられる。

本章では、連続繊維棒材の構成材料である樹脂に着目し、種々のアルカリ環境への浸漬・暴露における樹脂単体および連続繊維棒材の基礎的な耐久性を、質量変化と微小硬度から検討した。また、同様の環境下に浸漬・暴露した連続繊維棒材を用いて片引試験を実施し、付着性能の経時変化を明らかにするとともに、連続繊維棒材の樹脂の耐アルカリ性に対する評価法を併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 樹脂および連続繊維棒材の耐アルカリ性試験

樹脂の耐アルカリ性に関する基礎的なデータを得るため、連続繊維棒材に使用される樹脂を単体で硬化させた樹脂の注型板および連続繊維棒材そのものを種々の方法でアルカリ環境に暴露し、暴露中の質量変化と、暴露後の表面あるいは横断面の樹脂部分の微小硬度(Micro Vickers Hardness)を測定した。樹脂板および連続繊維棒材の一覧を、試験要因とともにTable 4.1に示す。

Table 4.1 Specimens in Alkaline Resistance Test

| Resin Plate | Alkaline Solution Immersion | | | Mass Change | Micro Vickers Hardness 1, 3 Month |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------|-------------|--------------------------------------|
| | Solution | Temperature(°C) | Symbol | | |
| Resin for Aramid Deformed | (without Immersion) | | N | — | ○ |
| | Alkaline Solution | 20 | A2 | ○ | ○ |
| | | 60 | A6 | ○ | ○ |
| Resin for Carbon and Aramid Braids | Tap Water | 20 | W2 | ○ | ○ |
| | | 60 | W6 | ○ | ○ |

*Resin used in carbon braid is the same as that used in aramid braid. * ○: Done.

| FRP Bar | Alkaline Solution Immersion | | | Mass Change | Micro Vickers Hardness 1, 3, 5 Month |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|--------|-------------|---|
| | Outdoor Exposure | | | | |
| | Solution | Temperature(°C) | Symbol | | |
| Aramid Deformed | (without Immersion) | | N | — | ○ |
| Carbon Strand | Alkaline Solution | 20 | A2 | ○ | ○ |
| Aramid Braid | | 60 | A6 | ○ | ○ |
| Carbon Braid | Tap Water | 20 | W2 | ○ | ○ |
| | | 60 | W6 | ○ | ○ |
| | Outdoor Exposure in Concrete | | COE | — | ○ |
| | Alkaline Solution 60℃ in Concrete | | CA6 | — | ○ |

* ○: Done.

Table 4.2 FRP Bars

| FRP Bar | Symbol | Fiber | Resin | Shape |
|-----------------|--------|--------------------|------------------|-------------------|
| Aramid Deformed | AD | Aramid (Tecnora) | Vinylester Resin | Deformed $\phi 6$ |
| Carbon Strand | CS | Carbon (PAN Type) | Epoxy Resin | Strand $\phi 7.5$ |
| Aramid Braid | AB | Aramid (Kevlar 49) | Epoxy Resin | Braid $\phi 8$ |
| Carbon Braid | CB | Carbon (PAN Type) | Epoxy Resin | Braid $\phi 8$ |

Table 4.3 Mechanical Properties of FRP bars

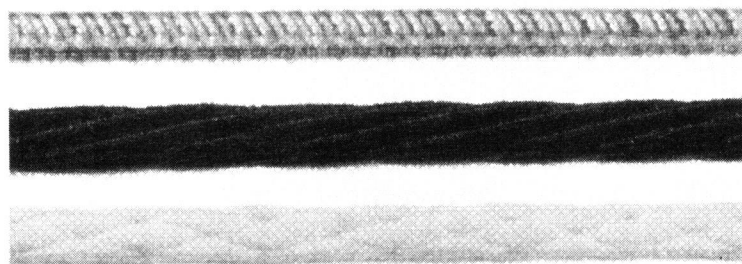
| FRP Bar | Nominal Diameter (mm) | Nominal Perimeter (mm) | Nominal Area (mm ²) | Effective Area (mm ²) | Pitch (mm) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Aramid Deformed | 6.43 | 20.2 | 32.5 | 28.3 | – |
| Carbon Strand | 7.59 | 23.8 | 45.3 | 30.4 | 87 |
| Aramid Braid | 7.54 | 23.7 | 44.6 | – | – |
| Carbon Braid | 7.43 | 23.3 | 43.3 | – | – |

| FRP Bar | Rupture Load (kN) | Tensile Strength (kN/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) | Elongation (%) | Unit Mass (g/m) | Thermal Coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) |
|-----------------|-------------------|--|---------------------------------------|----------------|-----------------|---|
| Aramid Deformed | 53.3 (56.9) | 1.88 | 53 | 3.6 | 36.0 | –6 |
| Carbon Strand | 65.3 (57.0) | 2.15 | 137 | 1.6 | 64~65 | 1.6 |
| Aramid Braid | 68.1 (62.8) | 1.53 | 67.6 | 2.26 | 58.0 | –2.2 |
| Carbon Braid | 89.8 (88.3) | 2.07 | 157 | 1.32 | 65.9 | – |

*Nominal area was obtained in accordance with JSCE–E131 “Proposed Quality Standards For Continuous Fiber Reinforcing Materials”. Nominal diameter and perimeter were calculated using them.

*Effective area is the area contributing to strength and/or stiffness. Tensile strength and Elastic modulus were calculated using it.

*Values in () in Rupture load represent the guaranteed values.



Aramid Deformed

Carbon Strand

Aramid Braid
Carbon Braid

Fig. 4.1 FRP Bar

a) 樹脂板および連続繊維棒材

現在市販されている連続繊維棒材のうち、アラミド異形棒($\phi 6$)、炭素より線($\phi 7.5$)、アラミド組紐($\phi 8$)および炭素組紐($\phi 8$)の4種類と、それらのうちアラミド異形棒に使用されている樹脂およびアラミド組紐と炭素組紐の両者に使用されている樹脂で作製した2種類の樹脂板を用いた。連続繊維棒材の諸元および機械的性質をそれぞれTable 4.2, Table 4.3に示す。また、それぞれの外観をFig. 4.1に示す。樹脂板は工場にて作成したもので、主剤に硬化剤および促進剤を添加して混合攪拌し、連続繊維棒材の作製時と同様の硬化条件で厚さ約 5mm の板状に硬化させたものとした。

b) 暴露環境

アルカリ環境は、

- (1) 樹脂板あるいは棒材をアルカリ溶液中に直接浸漬する環境
- (2) 棒材をコンクリート中に埋設し、屋外に放置する環境
- (3) 棒材をコンクリート中に埋設し、アルカリ溶液中に浸漬する環境

の3種類とした。アルカリ環境(1)では基準としての水道水も用いた。アルカリ環境(1)と(3)のアルカリ溶液への浸漬にあたっては、セメント中の主成分と同様の成分を持つ溶液として丸山⁴⁾が使用したアルカリ溶液(pH12.5~13.0, $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 2g/l, NaOH : 10g/l, KOH : 14g/l, 以下アルカリ溶液)を用いた。アルカリ環境(2)と(3)では、2.2で述べる片引試験と対応するように棒材を断面中央部に配したコンクリート供試体(寸法 100×100×100mm)を作製し、それを暴露した。用いたコンクリート(目標強度 30N/mm²)は2.2に示すものと同じである(Table 4.10)。浸漬温度は「連続繊維補強材の耐アルカリ試験方法(案)」¹⁰⁾の中で促進のための温度として示されている 60℃および基準温度としての 20℃の2レベル、暴露または浸漬期間は1, 3, 5ヶ月の3レベルとした。なお、アルカリ環境(2)と(3)では、それぞれの環境および期間用に必要に応じてコンクリートの圧縮試験用供試体を作成し、当該コンクリートの圧縮強度が得られるようにした。

c) 浸漬中の質量変化の測定

アルカリ溶液に直接浸漬した樹脂板および連続繊維棒材の浸漬中の質量変化を測定した。

i) 試験片の作製

樹脂版の試験片の寸法は、JIS K 7209「プラスチックの吸水率及び沸騰水吸水率試験方法」を参考に約 50×50×5mm に切断したものを、そのまま用いた。連続繊維棒材の試験片の長さは約 50mm とし、浸漬中に両端の切断面からの溶液浸入を防ぐため、切断面での繊維のけば立ちを研磨紙で取除き、両端面を 0.3~0.5g のエポキシ樹脂で覆った。なお、連続繊維棒材のみの質量変化を算出するため、同じ環境に暴露したエポキシ樹脂の質量変化も測定した。

試験片は同一要因につき 5 体用意し、このうち 3 体を質量変化測定用に、うち 1 体および残りの 2 体を、それぞれ 5 ヶ月および 1, 3 ヶ月浸漬経過後の微小硬度測定用とした。微小硬度を測定した供試体は、測定時に表面に損傷を与えているため、重量変化測定には用いていない。

ii) 浸漬と質量の測定

試験片表面をエタノールで洗浄した後、真空中で 2 日間乾燥させ、浸漬前の状態を一定としてから浸漬を開始した。浸漬は環境溶液を約 400ml 入れた蓋付きポリエチレン容器(容量 500ml)中で行い、一つの容器に 4~6 体の試験片を入れた。浸漬温度 20℃のものは恒温室内に、浸漬温度 60℃のものは温度調節器により 60℃に保った湯の中へ容器ごと設置した。環境溶液は浸漬開始後 1 ヶ月と 3 ヶ月で取替え、また浸漬開始後の 1 週間は 1 日 1 回、その後は 1 週間ごとに緩やかにかき混ぜて均一にした。所定の時間間隔で試験片取り出し、流水洗浄、ろ紙による表面ふき取りを行ってから、質量を測定した。

d) 微小硬度の測定

浸漬 0, 1, 3 および 5 ヶ月の試験片の表面樹脂部分の任意点、あるいは、横断面の表面付近や繊維付近の微小硬度を測定した。なお、コンクリート中に埋設した試験片は、所定の期間経過後に割裂してはつり出したものとした。流水洗浄後、横断面については、常温硬化型エポキシ樹脂中に埋設、硬化させたあと、精密低速切断機により切り出すとともに所定の研磨を行った。表面用の試験片は適宜切り出して作成した。試験片作製のため、測定開始は暴露期間終了から約 1 週間後となった。微小硬度測定時の研磨工程および設定をそれぞれ Table 4.4, Table 4.5 に示す。

Table 4.4 Grind Condition

| Process | Powder | Lubricator | Time |
|------------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------|
| Mechanical Grind | #2400 (Silicon Carbide 200 μ m) | Water | 2 minutes in Two Directions |
| Final Grind | Almina Powder (0.3 μ m) | Water | 5 minutes in Two Directions |

Table 4.5 Vickers Hardness Measurement Condition

| | |
|---------------|---|
| Load | 10 gf or 2 gf |
| Load Rate | 3 μ m/sec. |
| Load Time | 15 sec. |
| Magnification | 400 \times (40 \times Object Lens) |
| Symbol | HV _{0.01} or HV _{0.002} |

なお、微小硬度は、ひし形の圧子貫入くぼみの対角線の長さから、次式によって算

出した。

$$HV = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F \sin(\theta/2)}{d^2} = 0.1891 \times \frac{F}{d^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

ここに、 HV : 微小硬度
 F : 試験荷重(N)
 S : くぼみの表面積(mm²)
 θ : くぼみの対角線の長さの平均(mm)
 d : ダイヤモンド圧子の対面角度(=136°)

2.2 アルカリ環境に暴露した連続繊維棒材の片引試験

コンクリート中の環境が連続繊維棒材の付着性状に与える影響を検討するため、連続繊維棒材を種々の方法でアルカリ環境に暴露し、所定の期間経過後に片引試験を実施した。暴露方法は2.1a)に示した3種類である。また、片引試験の結果を評価するため、事前に非浸漬の連続繊維棒材を対象としてコンクリート強度を要因とした片引試験を行い、基本的な付着性状を把握した。非浸漬の供試体およびアルカリ環境(1), (2), (3)の供試体一覧を、それぞれ Table 4.6およびTable 4.7, Table 4.8, Table 4.9に示す。

a) 連続繊維棒材

2.1で使用した連続繊維棒材のうち、アラミド異形棒、炭素より線およびアラミド組紐の3種類を用いた。

b) 暴露環境

アルカリ環境、浸漬温度、暴露または浸漬期間ともに、2.1a)と同様とした。コンクリートの圧縮試験用供試体も、同様に作成した。

c) 片引試験

「引抜き試験による連続繊維補強材のコンクリートとの付着強度試験方法(案)」¹⁾に準拠して、アルカリ環境に暴露した連続繊維棒材の片引試験を実施した。

Table 4.6 Specimens without Immersion

| Specimen | FRP Bar | | Concrete | |
|----------|--------------------|--|--|--|
| | | | Compressive Strength (N/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) |
| AD-N1 | Aramid Deformed | | 26.6 | 29.6 |
| AD-N2 | | | 28.5 | 29.9 |
| AD-N3 | | | 30.0 | 31.0 |
| AD-N4 | | | 47.7 | 36.6 |
| CS-N1 | Carbon Strand | | 26.6 | 29.6 |
| CS-N2 | | | 28.5 | 29.9 |
| CS-N3 | | | 30.0 | 31.0 |
| CS-N4 | | | 47.7 | 47.7 |
| AB-N1 | Aramid Braid | | 38.2 | 31.3 |
| AB-N2 | | | 37.8 | 34.2 |
| AB-N3 | | | 44.4 | 35.6 |

**Table 4.7 Specimens in Alkaline Environment (1)
(Direct Immersion)**

| Specimen | FRP Bar | Alkaline Solution / Tap Water Immersion | | Concrete | |
|----------|--------------------|--|-------------------|--|--|
| | | Temperature (°C) | Period (Month) | Compressive Strength (N/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) |
| AD-I2-1 | Aramid Deformed | 20 | 1 | 29.2 | 26.4 |
| AD-I6-1 | | 60 | | | |
| AD-I2-3 | | 20 | 3 | 32.1 | 27.7 |
| AD-I6-3 | | 60 | | | |
| AD-I6-6 | Carbon Strand | 60 | 6 | 31.8 | 32.7 |
| CS-I2-1 | | 20 | 1 | 38.7 | 31.5 |
| CS-I6-1 | | 60 | | | |
| CS-I2-3 | | 20 | 3 | 34.3 | 30.0 |
| CS-I6-3 | | 60 | | | |
| CS-I6-6 | | 60 | 6 | 31.8 | 32.7 |
| AB-I6-1 | Aramid Braid | 60 | 1 | 35.5 | 34.8 |
| AB-I6-3 | | | 3 | 35.1 | 32.0 |
| AB-I6-5 | | | 5 | 37.9 | 30.1 |

* See also Table 4.2 for symbols.

ex. I2-3 represents "Immersed directly in 20°C alkaline solution for 3 month".

Table 4.8 Specimens in Alkaline Environment (2)
(Outdoor Exposure in Concrete)

| Specimen | FRP bar | Outdoor Exposure | Concrete | |
|----------|----------|-------------------|--|--|
| | | Period (Month) | Compressive Strength (N/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) |
| AD-OE-3 | Aramid | 3 | 36.7 | 32.4 |
| AD-OE-6 | Deformed | 6 | 40.2 | 33.3 |
| CS-OE-3 | Carbon | 3 | 36.9 | 31.5 |
| CS-OE-6 | Strand | 6 | 38.7 | 31.7 |
| AB-OE-3 | Aramid | 3 | 40.0 | 31.7 |
| AB-OE-6 | Braid | 6 | 43.2 | 32.2 |

* See also Table 4.2 for symbols.

ex. OE-6 represents "Exposed outdoor for 6 month".

Table 4.9 Specimens in Alkaline Environment (3)
(Alkaline Solution Immersion in Concrete)

| Specimen | FRP bar | Alkaline Solution Immersion | | Concrete | |
|----------|----------|-----------------------------|-------------------|--|--|
| | | Temperature (°C) | Period (Month) | Compressive Strength (N/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) |
| AD-A2-3 | Aramid | 20 | 3 | 39.5 | 31.3 |
| AD-A6-3 | Deformed | 60 | | 32.1 | 28.2 |
| AD-A2-6 | | 20 | 6 | 39.6 | 32.4 |
| AD-A6-6 | | 60 | | 34.5 | 27.9 |
| CS-A2-3 | Carbon | 20 | 3 | 38.7 | 32.2 |
| CS-A6-3 | Strand | 60 | | 33.4 | 28.4 |
| CS-A2-6 | | 20 | 6 | 41.5 | 32.6 |
| CS-A6-6 | | 60 | | 34.9 | 27.9 |
| AB-A6-3 | Aramid | 60 | 3 | 32.4 | 28.4 |
| AB-A6-6 | Braid | | 6 | 35.0 | 27.1 |

* See also Table 4.2 for symbols.

ex. A6-3 represents "Immersed with concrete in 60°C alkaline solution for 3 month".

i) 供試体の作製

アルカリ環境(1)の供試体に用いる連続繊維棒材は、全長約 500mm に切断した一端 150mm 程度をアルカリ溶液に浸漬し、所定の期間経過後に引き上げ、表面の付着物質を乾布で取り除き、翌日の打設まで気中に放置した。コンクリート寸法は 100×100×100mm、載荷端側に非付着区間を設けて付着長さ 64mm で一定とし、棒材を水平に配置する横打ち打設を行っ

た。なお、割裂補強用らせん鉄筋($\phi 6$)を配置した。アルカリ環境(2)と(3)の供試体は、非浸漬の棒材でアルカリ環境(1)と同様に作製し、そのまま屋外へ暴露するか、または、側面からのみ環境溶液が浸入するようにシールしたうえでアルカリ溶液中に浸漬した。供試体は同一要因につき 5 体作製した。

供試体の形状・寸法をFig. 4.2に示す。コンクリートの目標強度は 30N/mm^2 とした。また、各種連続繊維棒材の基本的な付着性状を把握するため、非浸漬の棒材を対象として数レベルの強度を目標としたコンクリートも用いた。示方配合をTable 4.10に示す。

ii) 载荷方法と測定項目

棒材の端に定着用膨張材を充填した鋼管スリーブを取り付け、载荷速度を $5\sim 6\text{kN/min}$ としながら自由端変位がおよそ 6mm となるまで単調漸増载荷した。測定項目は以下の通りである。

(1) 引抜き荷重: センターホール型ロードセル(容量 100kN)で測定した。

(2) 自由端変位: 電気出力付きダイヤルゲージ(容量 30mm)で測定した。

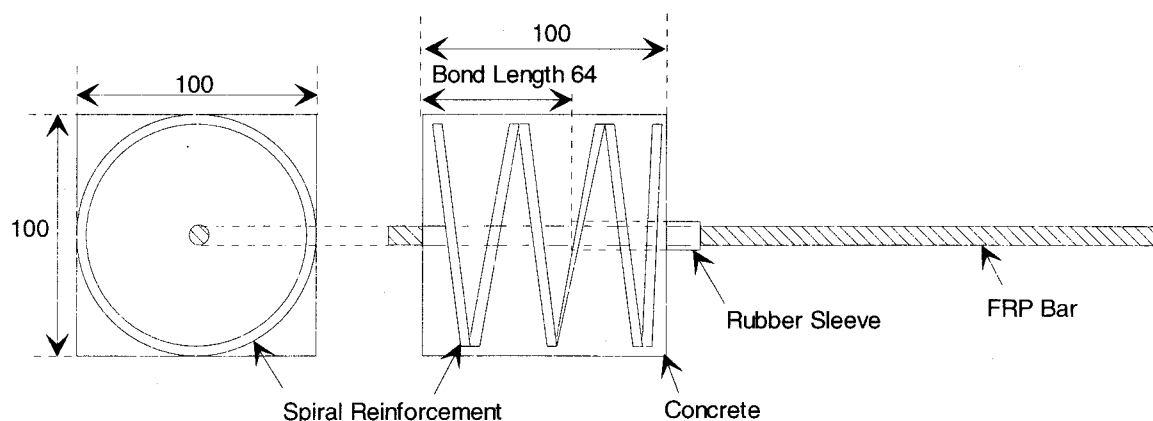


Fig. 4.2 Pull-out Test Specimen

Table 4.10 Mix Proportion of Concrete

| Target Strength f_{cr} (N/mm^2) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit mass (kg/m^3) | | | | WRA (cc/m^3) |
|---|----------------|---------------|------------|------------|------------|-------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G | |
| 30 | 15 | 8 ± 1 | 4 | 62 | 49 | 181 | 292 | 871 | 924 | 730 |
| 40 | 15 | 8 ± 1 | 4 | 56 | 49 | 181 | 323 | 858 | 910 | 808 |
| 50 | 15 | 8 ± 1 | 4 | 46 | 49 | 181 | 393 | 830 | 881 | 984 |

3. 樹脂板の吸水と微小硬度

環境剤の収着や表面の溶出などにより発生する質量変化は、環境剤が個々の構成材料すなわち繊維と樹脂あるいはそれらの界面へ影響を与え、物理的・機械的性質の低下が現れていることを表す指標となる。界面破壊による亀裂の発生を誘発することもあり、その場合はさらに環境剤の浸入が促進され、大きな性能の低下につながりやすい。ここでは、まず樹脂版の吸水特性について検討するとともに、機械的特性の変化を表面や断面の微小硬度により評価した。

樹脂板の質量変化を、横軸を $\sqrt{\text{浸漬時間}}$ としてFig. 4.3に示す。また、質量変化速度が大きい初期段階を直線近似し、その傾きをTable 4.11に示す。

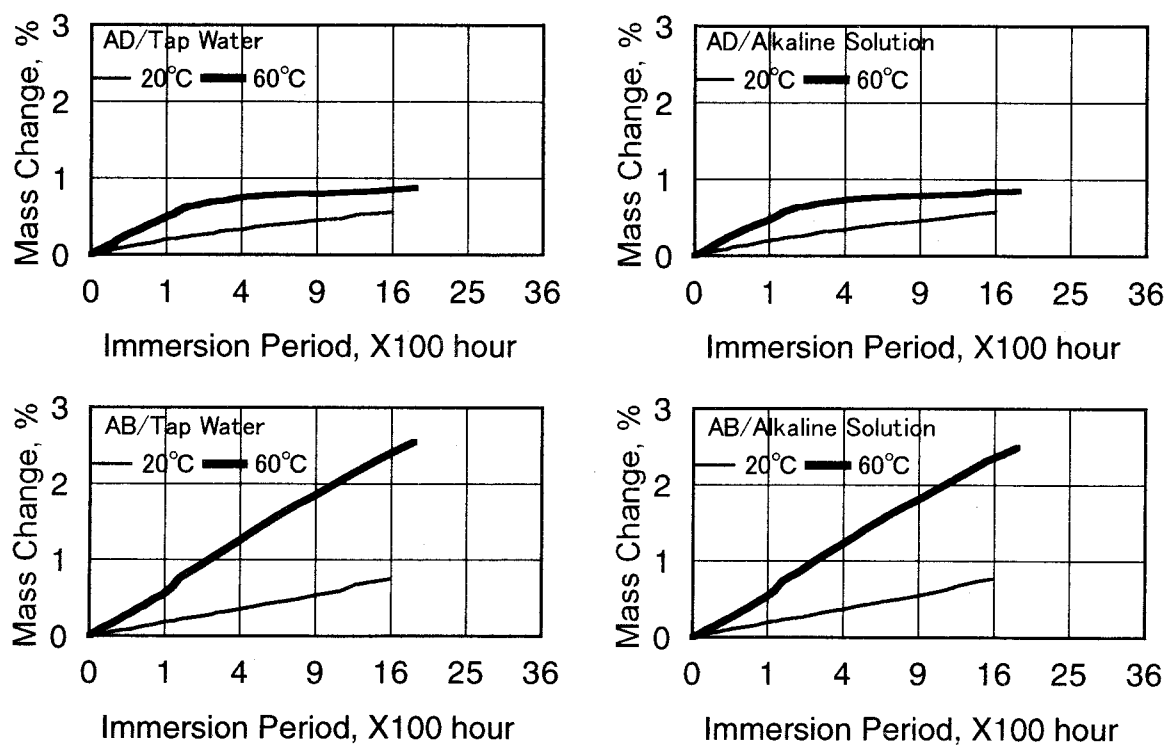


Fig. 4.3 Mass Change (Resin Plates)

Table 4.11 Mass Change Rate of Resin Plates Immersed in Tap Water

| Immersion | | AD | AB |
|-------------------|------------------|-------|-------|
| Solution | Temperature (°C) | | |
| Alkaline Solution | 20 | 0.014 | 0.019 |
| | 60 | 0.046 | 0.061 |
| Tap Water | 20 | 0.014 | 0.019 |
| | 60 | 0.046 | 0.061 |

Unit: %/ $\sqrt{\text{hour}}$

3.1 吸水特性

浸漬中の質量増加は、樹脂板の吸水によるものと考えられる。プラスチックへの環境剤の収着および拡散は Fick の第 2 法則に従うとされる⁵⁾が、いずれの樹脂板も浸漬の初期には $\sqrt{\text{浸漬時間}}$ に対してほぼ直線的な質量増加を示したことから、その傾向が確認できる⁶⁾。樹脂板の厚さが均一であり、また表面が滑らかであることに加えて、連続繊維棒材のように繊維との界面が存在しないために、理想的な吸水状態にあったと考えられる。

2160 時間での質量変化率は、20°C では両樹脂板とも 1% 未満にとどまるが、60°C の場合、AD で 0.9% 程度、AB で 2.5% 程度となった。

60°C で浸漬した AD は、400 時間程度で質量変化速度が大幅に低下し、ほぼ平衡吸水といえる状態になるとともに、質量変化率は 1% 程度に留まった。このことから、溶液中への樹脂の溶出など著しい吸水劣化に至る可能性は低い。また、この段階での機械的性質を評価することで、安全側の評価ができる可能性がある。一方、AB は 2160 時間でも依然同じ速度で吸水が続いているため、今後、より長期の検討が必要である。

浸漬開始後の吸水速度は、Table 4.11 に示すように両樹脂板で差があるが、ともに 60°C では 20°C に比べてほぼ 3 倍程度の促進効果がみとめられる。一方、両樹脂板とも、アルカリ溶液としたことによる顕著な差は認められず、影響は微小であった。質量測定時に溶液から引き上げると表面に白い付着物がみられたが、これは水で洗い流すことのできる程度のものであり、また、きれつやひび割れ、白色化などの外観変化あるいは表面溶解などが生じた様子は見られなかった。以上から、現時点では温度の影響が支配的であるといえる。

3.2 微小硬度

微小硬度は、試料に残された圧痕の大きさを測定する方法であり、試験面付近の圧縮・せん断降伏応力に関係する⁷⁾。AD や AB が属する熱硬化性樹脂では、溶剤の種類によっては膨潤し、硬さや強さの低下を招くことが知られており⁸⁾、また、加水分解の進行による性能の変化は非可逆的⁹⁾であるとされている。

樹脂板の表面の微小硬度を、横軸を $\sqrt{\text{浸漬時間}}$ としてFig. 4.4に示す。非浸漬のADの微小硬度は20程度、ABは25程度と種類によって差があるが、両樹脂とも、環境にかかわらず変化は小さい。60℃で浸漬したABで5程度低下していたが、重量変化率と対応するものではない。720時間での樹脂板の断面の微小硬度分布をFig. 4.5に示す。両樹脂とも環境溶液による有意な差は見られず、表面からの硬度分布も変化していない。最大で2.5%程度の質量変化の段階では、微小硬度に現れる程度の劣化は認められない。

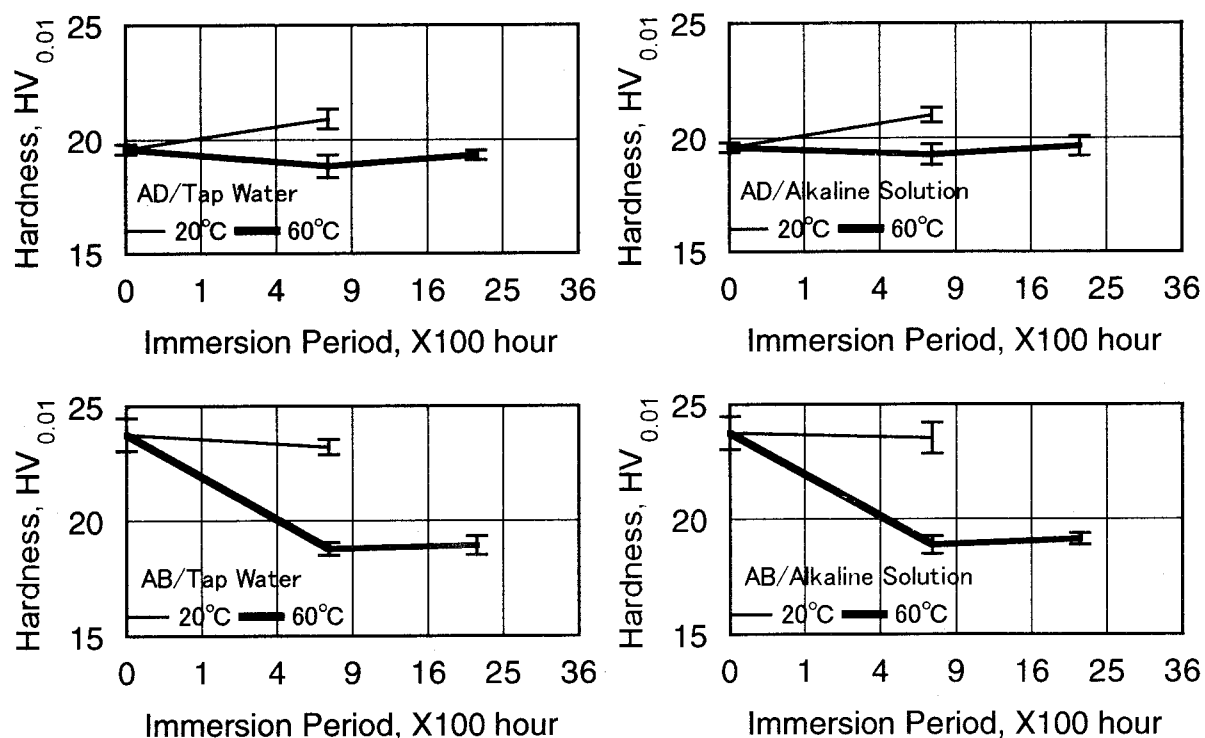


Fig. 4.4 Surface Vickers Hardness (Resin Plates)

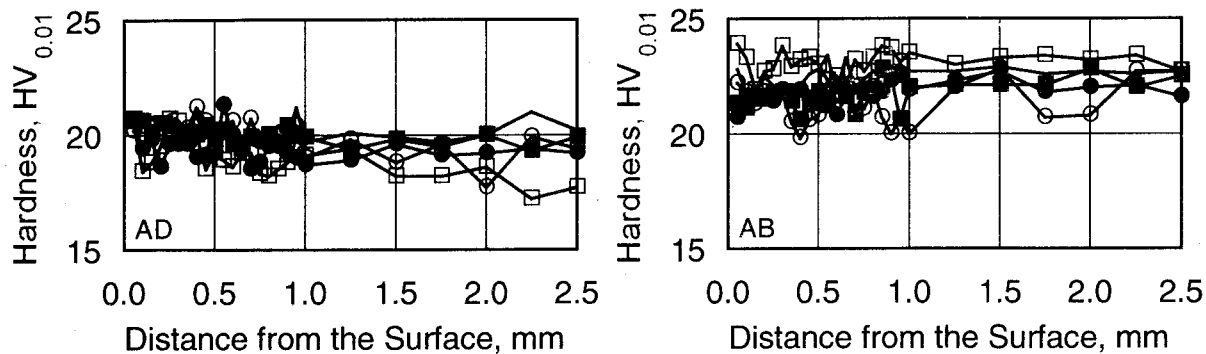


Fig. 4.5 Section Vickers Hardness (Resin Plates, 720 hours)

(—: without Immersion ○, ●: Tap Water 20°C, 60°C □, ■: Alkaline Solution 20°C, 60°C)

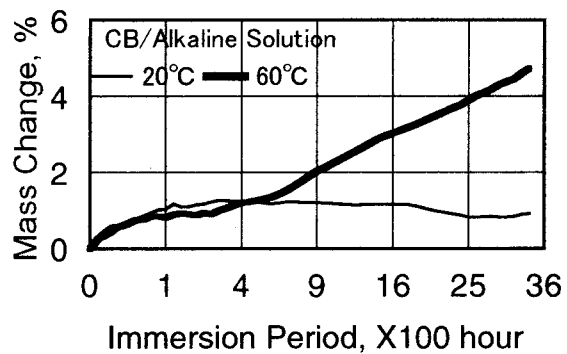
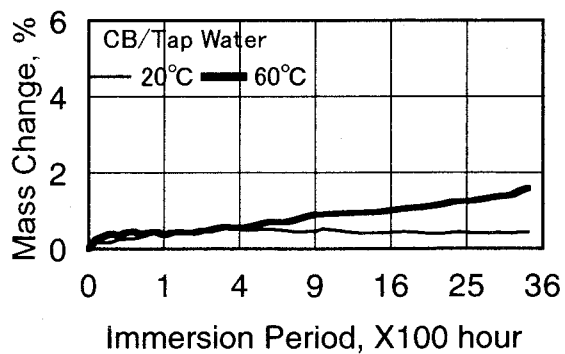
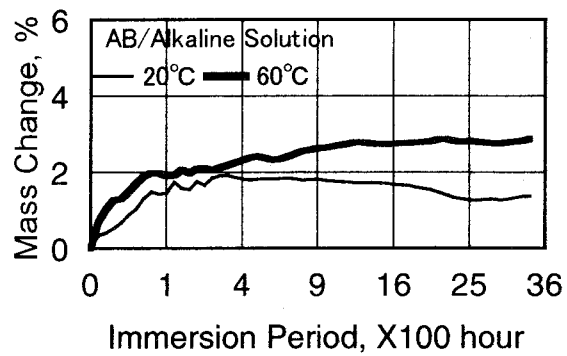
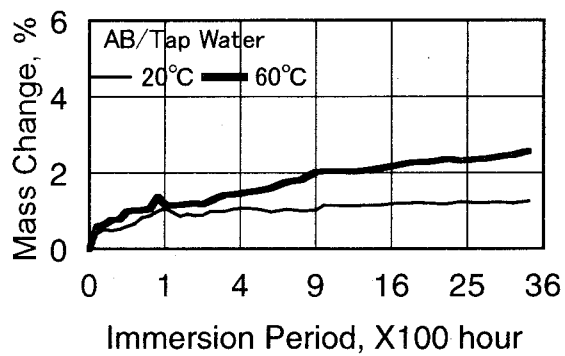
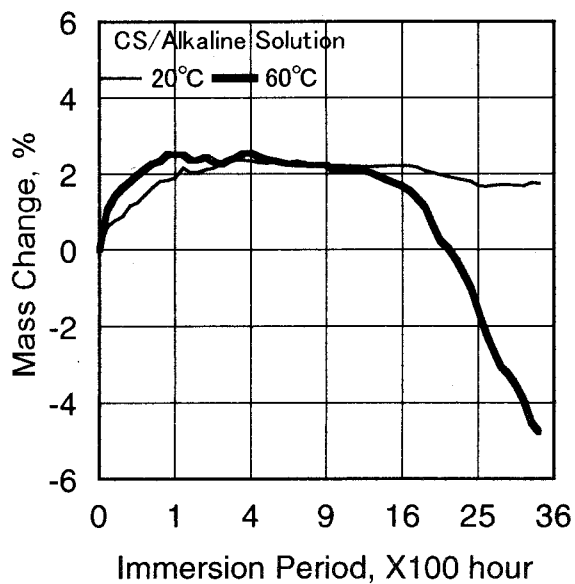
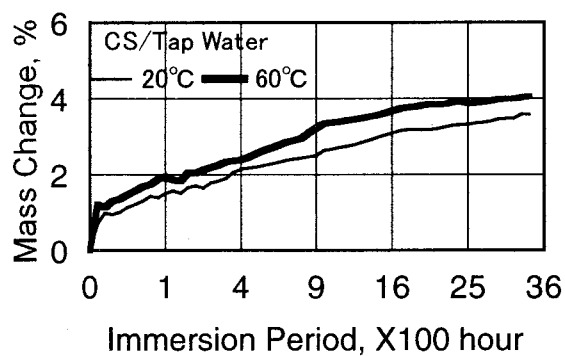
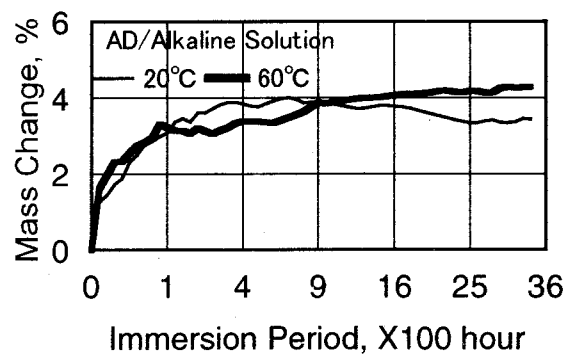
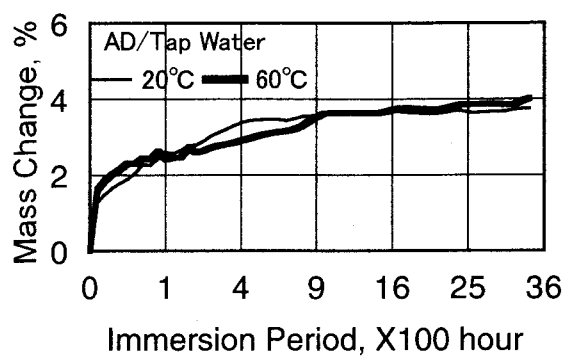


Fig. 4.6 Mass Change (FRP Bars)

4. 連続繊維棒材の吸水と微小硬度

連続繊維補強材は複合材料であり、一般に、構成材料である繊維や樹脂単体の劣化とは異なる特有の劣化が見られる⁹⁾。そこで、連続繊維棒材についても同様に吸水特性について検討するとともに、機械的特性の変化を表面や断面の樹脂部分の微小硬度により評価した。

連続繊維棒材の質量変化を、横軸を $\sqrt{\text{浸漬時間}}$ としてFig. 4.6に示す。AD に特に顕著に見られる浸漬開始直後の比較的大きな質量変化率は、複雑な表面形状のため紙で拭いきれない環境溶液のためと思われ、実験手順上の問題と考えられるので、吸水の評価においてはその量を差し引く必要がある。また、表面積や断面形状が異なるため、異なる連続繊維棒材での差を議論するには注意を要する。

4.1 吸水特性

樹脂板と同様、Fig. 4.6にみられる浸漬中の質量増加は、連続繊維棒材の吸水によるものと考えられる。一般に FRP の吸水においても吸水初期には近似的に Fick の第 2 法則に従うとされており⁹⁾、その傾向が認められる。しかし、樹脂板に比べて樹脂部分の厚さが非常に薄いため、比較的短期間で樹脂が吸水した後、繊維と樹脂の界面への吸水が始まったためと推定される同一要因 3 体のばらつきや曲線の乱れも認められる。これは、特に促進環境である 60℃あるいはアルカリ溶液において研著である。

いずれの棒材でも各浸漬時間における質量変化率は、20℃水道水よりも 60℃水道水で大きくなり、浸漬温度を高めることによる吸水の促進効果がみられるが、その促進程度は棒材によって異なり、樹脂板の試験結果とは異なる結果が得られた。繊維と樹脂界面の存在により、FRP 特有の吸水⁹⁾が生じているものと考えられる。また、アルカリ溶液では、60℃で水道水とは異なる質量変化率の増加あるいは減少を示す棒材もみられる。

AD は、60℃水道水では 100 時間程度で一度平衡に達してから、再び吸水が始まり 4%程度で平衡に達している。温度による促進は微少である。水道水とアルカリ溶液とで質量変化率曲線に顕著な違いは見られず、3600 時間での質量変化率は 60℃のもので 5%以下であった。表層部の巻付け繊維部周辺や繊維と樹脂の界面への吸水が生じていると思われるが、アルカリ成分が存在しても特に吸水が加速されることはないようである。

CS は、いずれの浸漬温度でもほぼ一定の速度で吸水が進行し、2160 時間で 4%程度に達している。炭素より線は 7 本の単線から構成され、各単線には巻き付け繊維が施されているため、環境液に接触する部分がほかの棒材と比べて大きい。次に示す組紐状棒材との吸水量の差は、両棒材の表面積の違いが原因と思われる。CS では水道水とアルカリ溶液とで顕著な違いがみられ、水道水では 3600 時間でも吸水が続いているが、60℃のアルカリ溶液では質量変化率は 100 時間まで増加し、1000 時間程度まではほぼ一定の値を保持するものの、その後急激に減少して 2160 時間では-6%にまで達しているものがある。この質量減少は、加水分

解反応の著しい進行による構成材料の環境液中への溶解を意味し、その溶出成分としてはマトリクス樹脂であるエポキシ樹脂あるいは被覆繊維であるポリエステル繊維が考えられる。

AB は、100 時間での質量変化率は 1% 程度と炭素より線よりも小さく、2160 時間でも 60℃ の水道水で 2% 強にとどまっている。20℃ の水道水では、100 時間で 1% 程度に達するとそれ以降はほぼ横ばいとなり、ほとんど吸水は進行していない。また、アラミド異形棒と同様にアルカリにより吸水が加速されることはなかった。

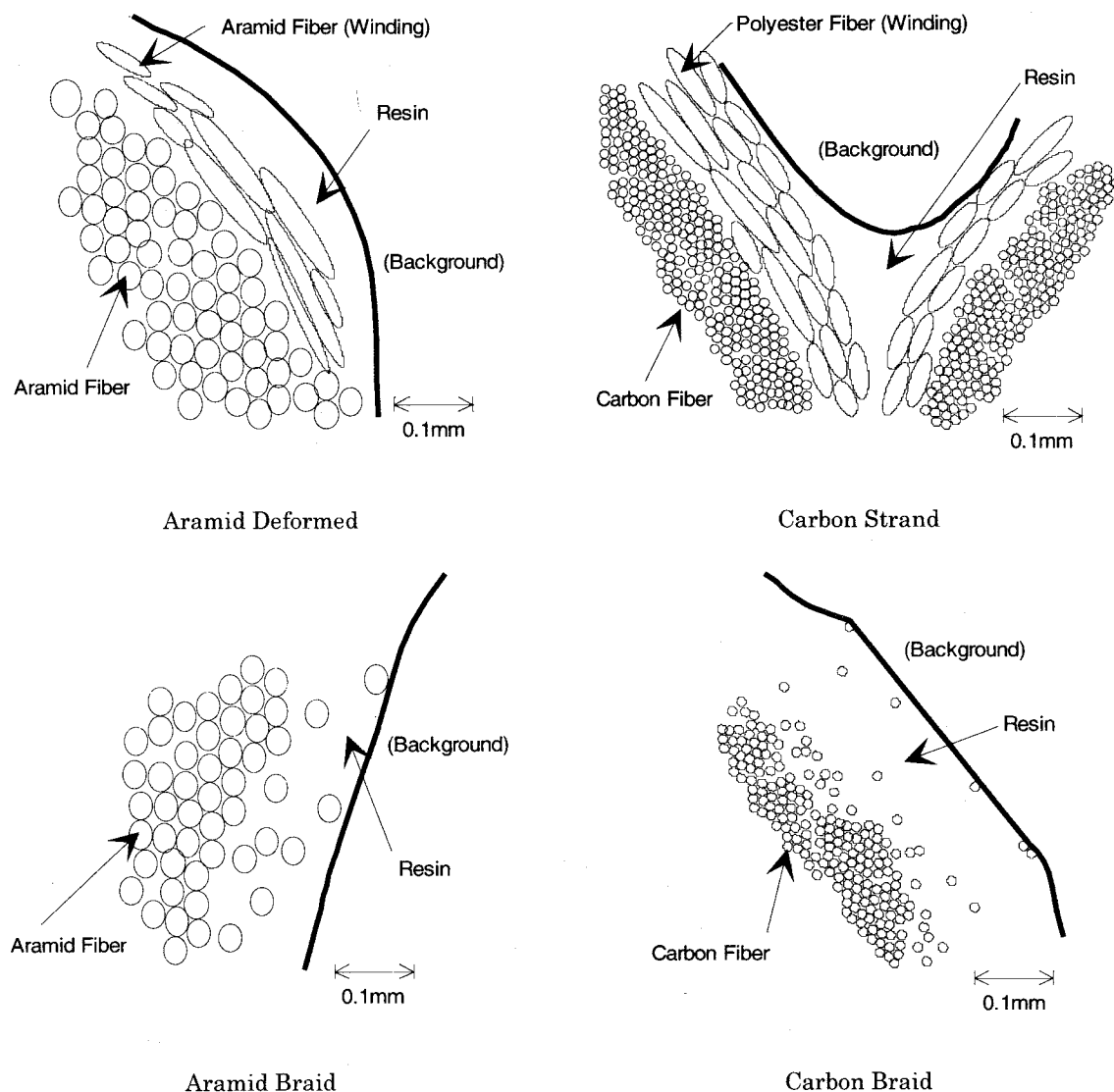


Fig. 4.7 Schematic View of Cross Section

CB は、60℃ の水道水では浸漬開始から徐々に吸水が続き、2160 時間で 2% 程度に達している。一方、20℃ の水道水では AB よりもさらに小さい質量変化率で吸水平衡状態に達している。しかし、60℃ アルカリ溶液に浸漬したもので顕著な質量増加がみられた。炭素組紐の

表面にはアルカリ成分と思われる白色の結晶が付着し、質量測定時に水で洗浄しても取り除くことはできなかった。この現象は棒材表面へのアルカリ成分の著しい収着を表している。

4.2 連続繊維棒材の安定性

棒材断面の表面付近の模式図をFig. 4.7に示す。ADの表面には巻付け繊維および軸方向繊維が施されており、表層の樹脂部の厚さは0~0.3mmと幅がある。またCSでは7本よりの単線ごとにポリエステル繊維が巻付けてあり、この被覆部分の厚さは0.2~0.4mmである。両棒材では樹脂層が非常に薄い所があり、また巻付け繊維の箇所には径30~60 μ mの空隙がいくつかみられた。ADやCSでは樹脂厚の薄い箇所から繊維と樹脂の界面への吸水が比較的容易に起こり、20℃の水道水でもこれらの領域への吸水が生じていると思われる。

ABは比較的表層付近まで繊維が分布し、樹脂部分の厚さは0~0.15mmと比較的薄く、一部で繊維が露出している箇所があった。CBの樹脂部分の厚さは0~0.4mmと幅があるものの、全般的にはABと比べてその厚さは大きい。ABやCBのような組紐状棒材の場合、20℃水道水では吸水速度が小さいため、水の浸入は表層の樹脂部分にとどまるが、浸漬温度を60℃とすることで吸水が加速されやすい性質を有しているものと思われる。

以上のことから、連続繊維棒材のアルカリに対する安定性を高めるためには、高い耐水性あるいは耐アルカリ性を有する樹脂を用いるだけでなく、含浸・硬化時の製造上の欠陥部を減少させること、均一な樹脂厚さを与えること、温度やアルカリによる促進に鈍感で、また平衡吸水に早期に至るなど予測しやすい特性を有する樹脂を用いることが有用であるといえる。

4.3 微小硬度

連続繊維棒材の表面樹脂部分の微小硬度は、棒材の種類によって値に差が認められたものの、いずれの暴露環境においても、暴露日数に関わらずほぼ一定値を保持していた。ADとCSでは20程度、ABは17程度、またCBは15程度であり、暴露により微小硬度値が5以上低下しているものはなかった。60℃のアルカリ溶液に浸漬した連続繊維棒材の、断面の樹脂部分の微小硬度分布をFig. 4.8に示す。ADとABにおいて若干の低下傾向が認められるが、顕著なものではない。質量変化の結果からは、連続繊維棒材のアルカリ劣化の形態として棒材表面へのアルカリ成分の収着、あるいは構成成分の環境液への溶出などが推察されたが、これらの質量変化を示した棒材でも、樹脂の微小硬度の変化はほとんど見られず、この段階では微小硬度での劣化は検出されなかった。溶出による質量減少を示したCSでも、非溶出部分では微小硬度に現れる程度の劣化はなかったと考えられる。

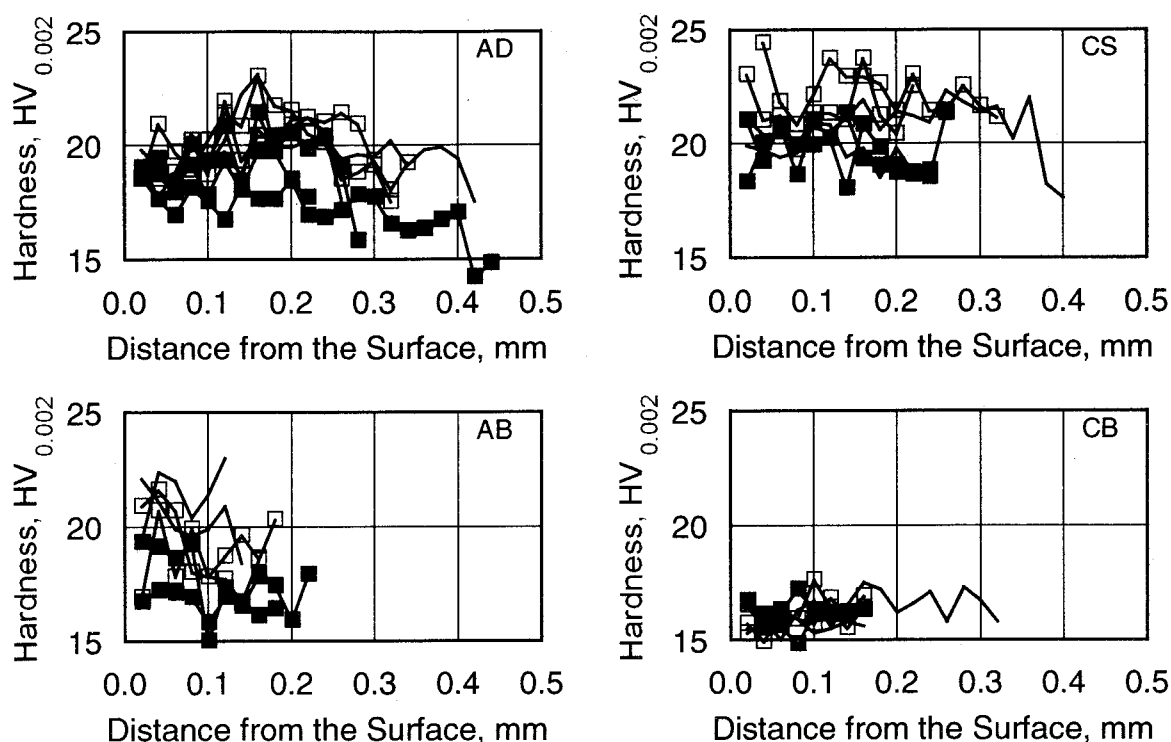


Fig. 4.8 Sectional Vickers Hardness (FRP Bars, Alkaline Solution 60°C)

(—: without Immersion □, ■: 2160, 3600 hours)

5. 連続繊維棒材の付着特性

5.1 非浸漬の連続繊維棒材

非浸漬の連続繊維棒材を用いた供試体の荷重－自由端変位曲線(P-d 曲線)をFig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11に示す. また, 「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」¹⁰⁾を参考に, 各供試体の P-d 曲線から最大荷重 P_{\max} , および自由端で 0.05mm, 0.10mm, 0.25mm の変位が生じる時の荷重 $P_{0.05}$, $P_{0.10}$, $P_{0.25}$ を読みとり, 最大平均付着応力 $\bar{\tau}_{\max}$, 平均付着応力 $\bar{\tau}_{0.05}$, $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ を算出した. $\bar{\tau}_{\max}$ とコンクリート強度 f'_c の関係を Fig. 4.12に示す. Fig. 4.12中には, $\bar{\tau}_{\max}$ の実験値を指数関数 $\bar{\tau}_{\max} = A \cdot (f'_c)^B$ (A , B : 実験定数)で回帰した曲線も併せて表示した. 各棒材の $\bar{\tau}_{\max}$ の回帰式をTable 4.12に示す. また, $\bar{\tau}_{0.05}$, $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ とコンクリート強度 f'_c の関係を棒材ごとにFig. 4.13示す.

Table 4.12 Regression of $\bar{\tau}_{\max}$

| Aramid Deformed | Carbon Strand | Aramid Braid |
|--|---|---|
| $\bar{\tau}_{\max} = 1.26 \cdot (f_c')^{0.60}$ | $\bar{\tau}_{\max} = 0.202 \cdot (f_c')^{0.74}$ | $\bar{\tau}_{\max} = 0.545 \cdot (f_c')^{0.78}$ |

a) アラミド異形棒

同一要因の供試体 5 体の中でも P-d 曲線の最大荷重や最大までの勾配にはばらつきがみられる。また最大時以降に荷重を若干維持しながら自由端に変位を生じるものがあり、付着破壊の形態は一通りでないものと考えられる(Fig. 4.9)。 $\bar{\tau}_{\max}$ はコンクリート強度の 0.60 乗に比例して増加する(Table 4.12)が、 $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ ではコンクリート強度の影響は顕著ではない(Fig. 4.13)。試験終了(自由端変位がおおよそ 6mm に達した時点)後に供試体を割裂して棒材とコンクリートの付着界面を目視観察したところ、コンクリート側の破壊も進行しているが、棒材表面の異形部分が削られ、巻付け繊維が露出しているのが確認できた。アラミド異形棒は、異形鉄筋と同様に棒材表面の凹凸によって機械的な付着力を発揮すると考えられるが、コンクリートからの引抜きに際しては、コンクリート側モルタル部分の破壊と同時に、棒材表面の変形、破壊も起こったことがわかる。

b) 炭素より線

表面形状の違いからアラミド異形棒やアラミド組紐とは異なる曲線形状となった(Fig. 4.10)。すなわち初期の曲線勾配は同等であるが、最大時以降の荷重は大きく低下することなく、ほぼ一定の荷重を保持しながら自由端に変位を生じる傾向がみられた。 $\bar{\tau}_{\max}$ はコンクリート強度の 0.74 乗に比例して増加する(Table 4.12)が、 $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ はコンクリート強度の影響を受けていない(Fig. 4.13)。試験終了後に供試体を割裂して棒材とコンクリートの付着界面を目視観察したところ、よりの溝はほとんど破壊されずに残っており、棒材表面には骨材によって付けられた傷がより合わせた単線の軸方向に確認された。炭素より線は、付着長(64mm)がよりのピッチ(87mm)よりも短い場合、変位が小さい間は単線周囲の巻付け繊維による比較的小さな凹凸によって機械的な付着力を発揮するが、その後は棒材とコンクリート界面における摩擦による付着力が主となり、コンクリート界面に形成された溝に沿って棒材が抜け出たものと考えられる。

c) アラミド組紐

アラミド異形棒とはほぼ同じ傾向の曲線形状が得られた(Fig. 4.11)。割裂補強用らせん鉄筋($\phi 6$)を配置していたが、いずれの供試体もコンクリートの割裂によって付着破壊に至り、最大時以降は急激に荷重が低下するとともに、自由端に大きな変位が生じた。アラミド組紐はアラミド異形棒と同様に棒材表面の比較的大きな凹凸によって機械的な付着力を発揮すると考えられるが、ほかの棒材に比べて棒材断面が大きく、またコンクリート中に配した割裂補

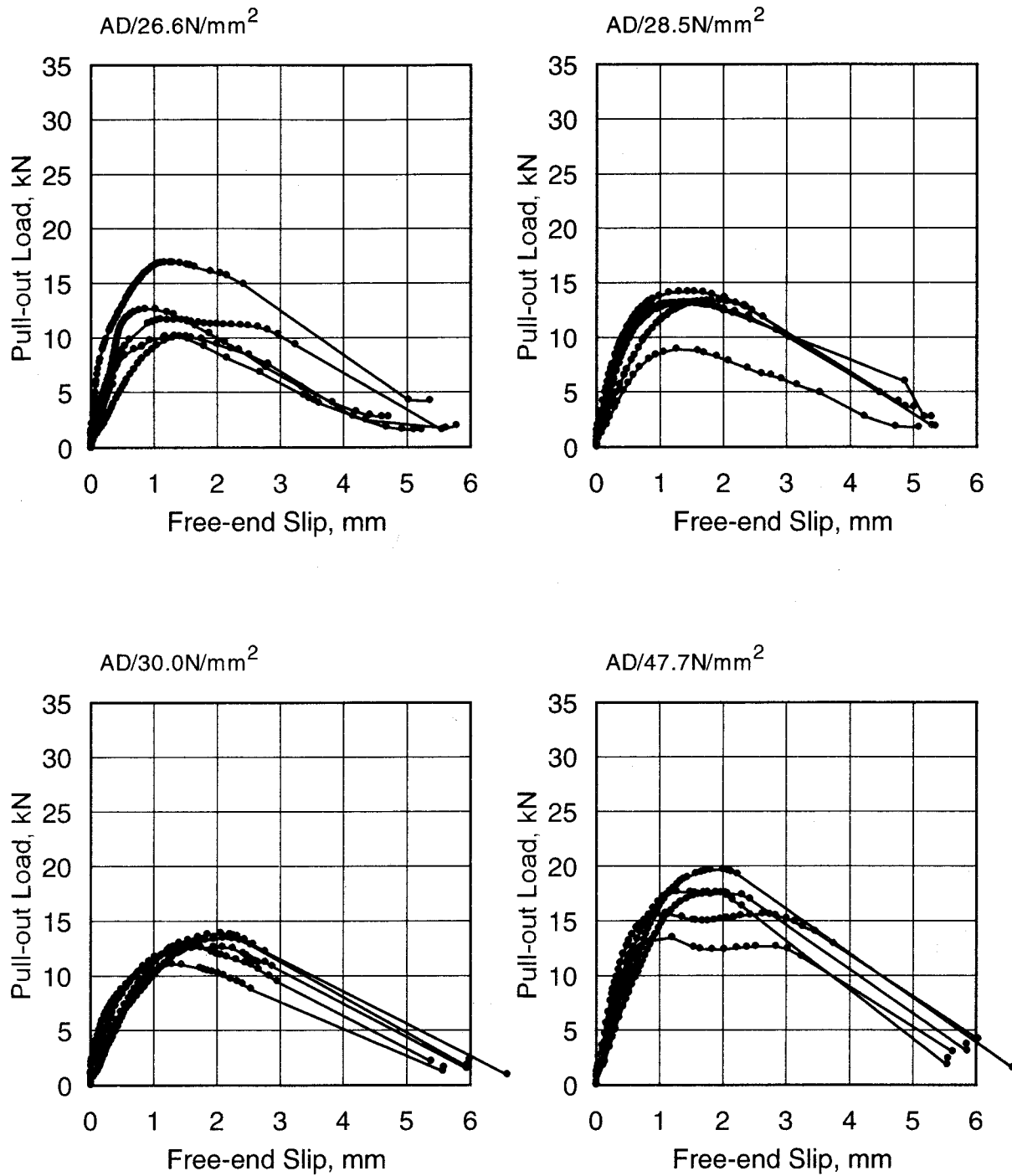


Fig. 4.9 Pull-out Test Results (Aramid Deformed, without Immersion)

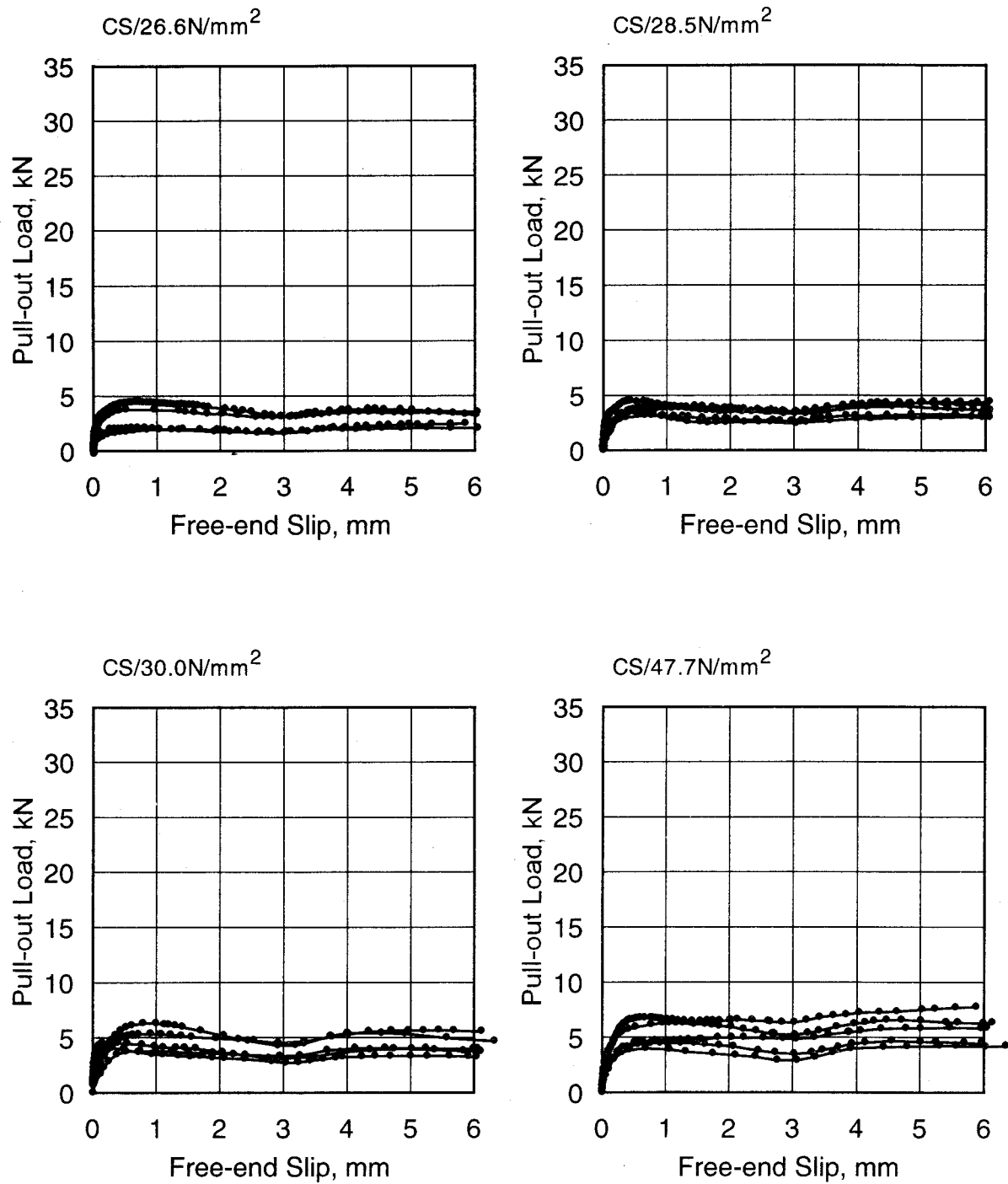


Fig. 4.10 Pull-out Test Results (Carbon Strand, without Immersion)

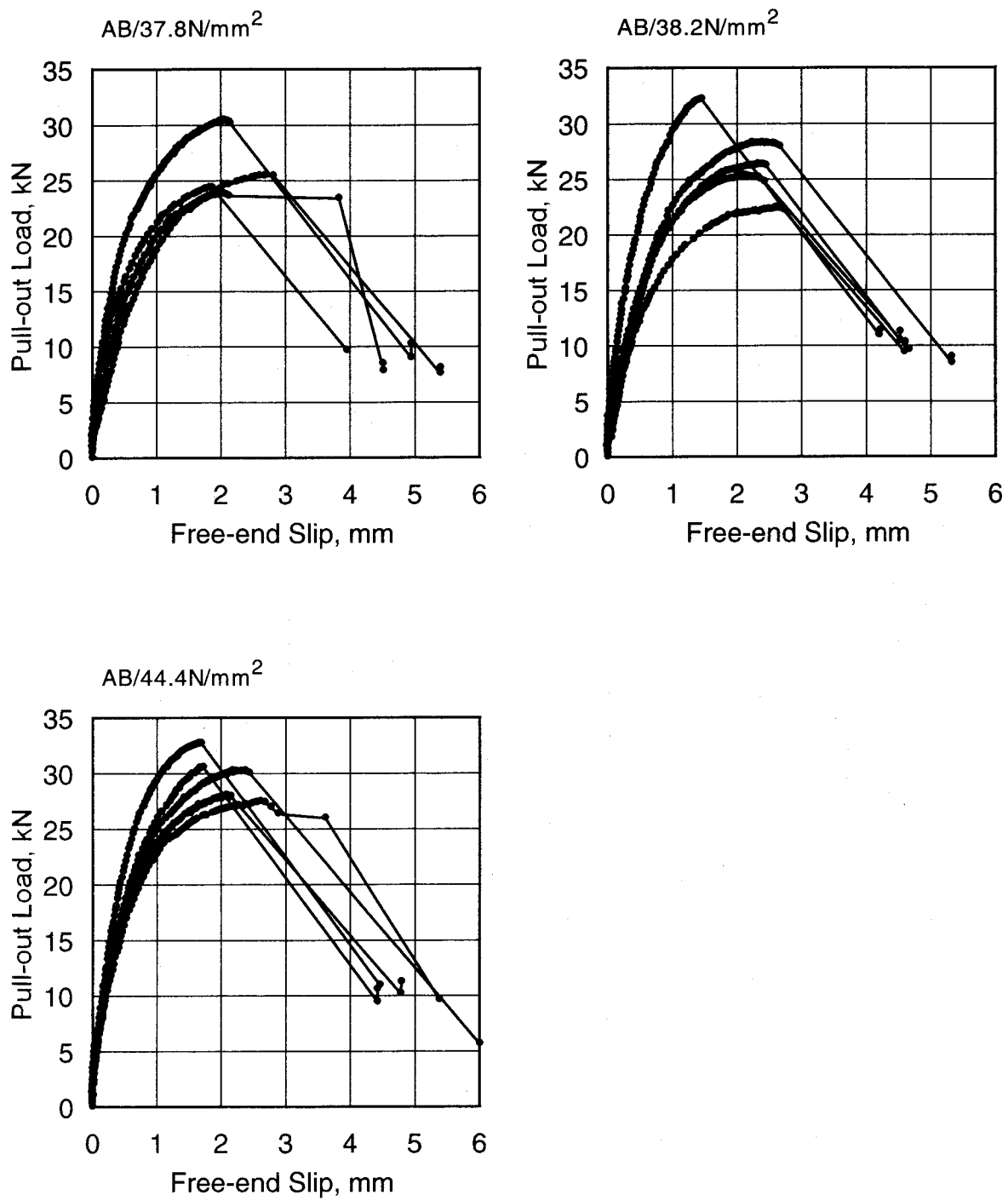


Fig. 4.11 Pull-out Test Results (Aramid Braid, without Immersion)

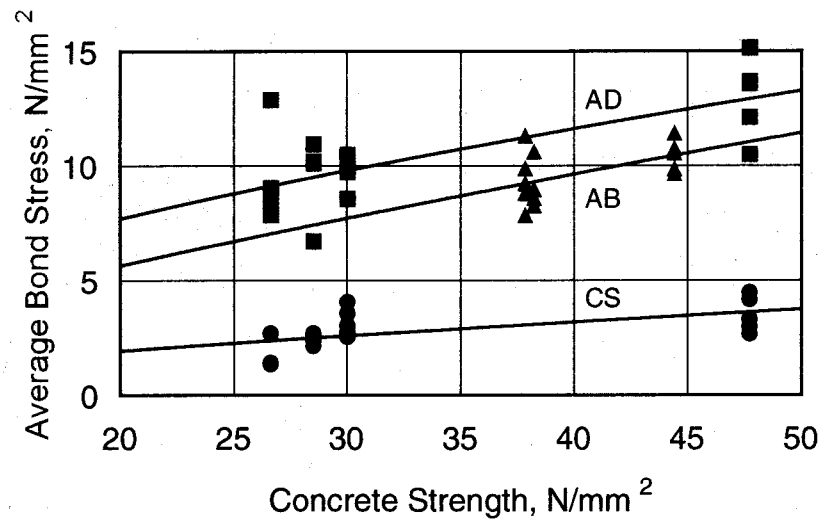


Fig. 4.12 $\bar{\tau}_{\max}$ (■: Aramid Deformed, ●: Carbon Strand, ▲: Aramid Braid)

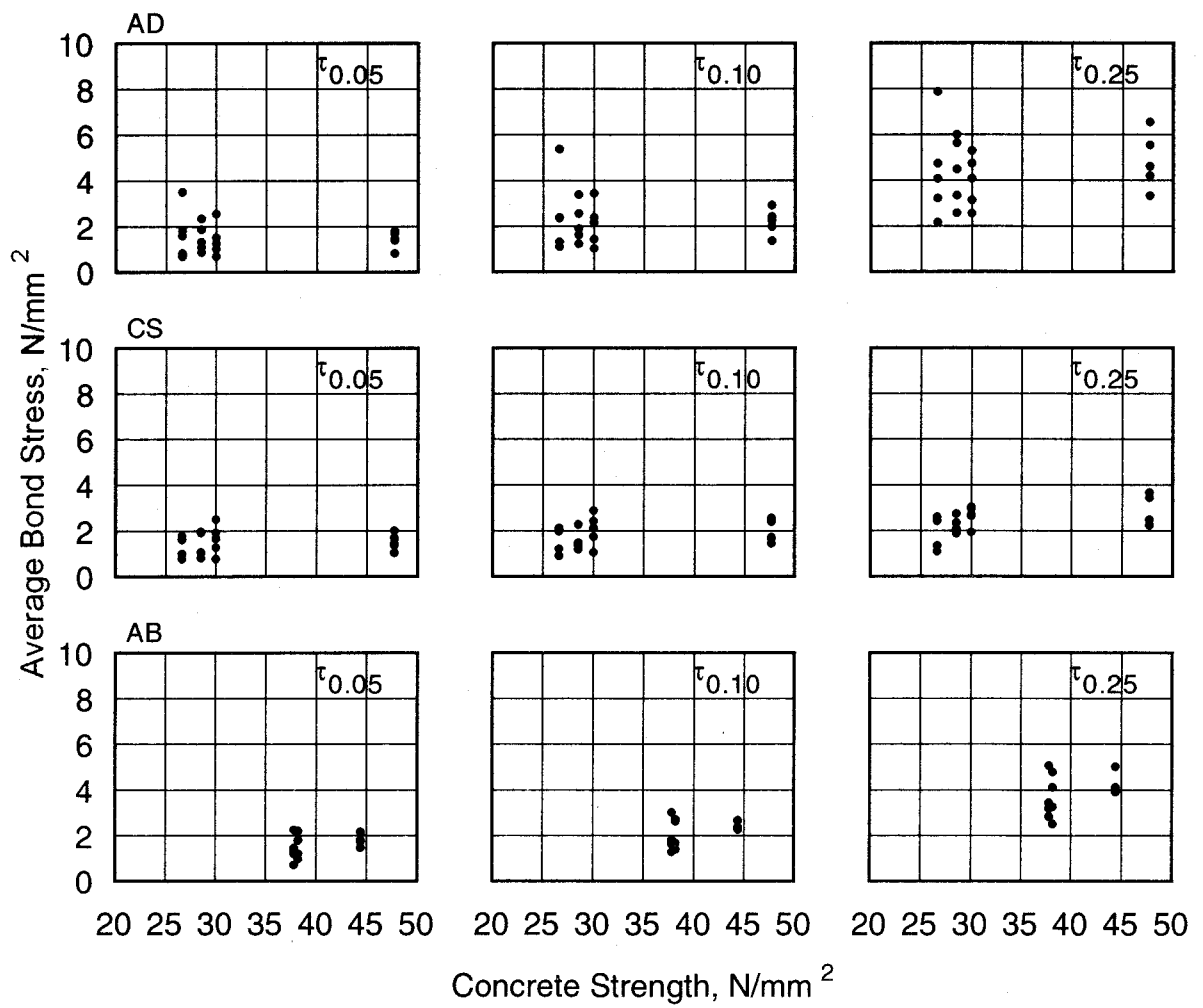


Fig. 4.13 $\bar{\tau}_{0.05}$, $\bar{\tau}_{0.10}$ and $\bar{\tau}_{0.25}$

強筋も外径の大きなもの(約 100mm)を使用したため、割裂破壊型の付着破壊形式になったと思われる。したがって、 $\bar{\tau}_{\max}$ はコンクリート強度の影響を強く受けることが推察され、3 本の棒材の中では回帰式の指数 B が 0.78 と最も大きい(Table 4.12)。また $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ でもわずかにコンクリート強度との相関がみられる(Fig. 4.13)。

5.2 片引試験による連続繊維棒材の付着評価方法

連続繊維棒材に対する片引試験の結果を評価するうえでは、鋼材と同様に、付着の最終段階における付着力 $\bar{\tau}_{\max}$ を把握しておくことと同時に、変位が開始する引抜き初期における付着力に着目することが、ヤング率が小さい樹脂の影響が単独で現れると考えられるため有用であると考えられる。「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験法(案)」¹⁰⁾では、最大付着応力度および自由端変位が 0.002D における平均付着応力を重要視しており、これらの平均付着応力を算定する際には、補正係数 $\alpha = 30/f'_c$ を乗じてコンクリート強度の補正を行うとしている。これに対して「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」¹⁰⁾では、付着割裂が生じる場合を除けば、コンクリート強度と必ずしも良い相関関係があるとは言えないため、コンクリート強度の補正は行わないとしている。

$\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ の値に与えるコンクリート強度の影響を把握するため、それぞれを同じコンクリート強度ごとに平均したものを Table 4.13 に示す。さらに、コンクリート強度に関わらず全てのデータの標準偏差を算出し、Table 4.14 に示す。 $\bar{\tau}_{0.05}$ は棒材によらず 0.5～2.5N/mm²、 $\bar{\tau}_{0.10}$ は 1.0～3.0N/mm²、 $\bar{\tau}_{0.25}$ は 2.0～6.0N/mm² の範囲にあり、いずれの平均付着応力もコンクリート強度の影響をほとんど受けていないと判断できる。さらに、コンクリート強度による試験値のばらつきを表している Table 4.14 によれば、アラミド異形棒の $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{0.10}$ および $\bar{\tau}_{0.25}$ のばらつきが他の棒材と比べてやや大きいようであるが、いずれの棒材でも、他の指標値より $\bar{\tau}_{0.05}$ のばらつきが最も小さい。これは、連続繊維棒材の表面に存在する樹脂の剛性がコンクリート側のモルタル部分より低いために、自由端変位発生初期段階における付着に与える棒材表面の樹脂の変形の影響が大きく、コンクリート側の変形の影響が小さいためと考えられる。また、 $\bar{\tau}_{0.05}$ が発生する時の荷重 $P_{0.05}$ は、各棒材でばらつくものの、その平均値はアラミド異形棒、炭素より線およびアラミド組紐でそれぞれ 1.88kN、2.02kN および 4.31kN であり、コンクリートに発生する圧縮応力はかなり低いレベルである。この場合、載荷端近傍の圧縮応力場が付着に与える影響は小さいと考えられる¹²⁾ため、 $\bar{\tau}_{0.05}$ はコンクリート強度の影響をあまり受けなかったことも要因として挙げられる。

以上のように、連続繊維棒材の付着の評価指標としては、 $\bar{\tau}_{0.05}$ が有効である。また、 $\bar{\tau}_{0.05}$ に対するコンクリート強度の補正を行うことは不必要であると考えられる。一方、 $\bar{\tau}_{\max}$ については、コンクリート強度の異なる供試体間で比較するうえではその影響は無視できないと考えられ、各棒材ごとに Table 4.12 の回帰式で補正した値により評価する必要がある。これら

の評価指標は、2.1a)に示した種々のアルカリ環境に暴露した連続繊維棒材の引抜き性状を評価する際に、連続繊維棒材そのものの変状を評価できるものであると考えて用いることとした。

Table 4.13 Average of $\bar{\tau}_{0.05}$, $\bar{\tau}_{0.10}$ and $\bar{\tau}_{0.25}$ (without Immersion)

| FRP Bar | f'_c | $\bar{\tau}_{0.05}$ | $\bar{\tau}_{0.10}$ | $\bar{\tau}_{0.25}$ |
|-----------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Aramid Deformed | 26.6 | 1.85 | 2.81 | 4.93 |
| | 28.5 | 1.45 | 2.09 | 4.35 |
| | 30.0 | 1.36 | 2.03 | 3.91 |
| | 47.7 | 1.37 | 2.13 | 4.80 |
| Carbon Strand | 26.6 | 1.23 | 1.49 | 1.82 |
| | 28.5 | 1.31 | 1.66 | 2.17 |
| | 30.0 | 1.57 | 1.99 | 2.61 |
| | 47.7 | 1.45 | 1.90 | 2.82 |
| Aramid Braid | 37.8 | 1.31 | 1.86 | 3.42 |
| | 38.2 | 1.48 | 2.04 | 3.61 |
| | 44.4 | 1.73 | 2.42 | 4.13 |

Unit: N/mm²

Table 4.14 Standard Deviation of $\bar{\tau}_{0.05}$, $\bar{\tau}_{0.10}$ and $\bar{\tau}_{0.25}$ (without Immersion)

| FRP Bar | $\sigma(\bar{\tau}_{0.05})$ | $\sigma(\bar{\tau}_{0.10})$ | $\sigma(\bar{\tau}_{0.25})$ |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Aramid Deformed | 0.704 | 1.025 | 1.456 |
| Carbon Strand | 0.483 | 0.567 | 0.637 |
| Aramid Braid | 0.474 | 0.561 | 0.816 |

Unit: N/mm²

5.3 アルカリ溶液に直接浸漬した連続繊維棒材

アルカリ溶液に直接浸漬した連続繊維棒材を用いた供試体について、P-d 曲線から求めた $\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}$ の経時変化を、横軸を $\sqrt{\text{浸漬時間}}$ として Fig. 4.14 に示す。 $\bar{\tau}_{\max}$ は、先述のとおりにコンクリート強度の補正を行い、Table 4.12 に示す回帰式に基づいて $f'_c = 30 \text{ N/mm}^2$ の値 $\bar{\tau}_{\max}^*$ に換算したものをを用いた。

アラミド異形棒では、1 ヶ月間の浸漬後では $\bar{\tau}_{\max}^*$ が低下しているものの、その後は 20℃、60℃のいずれの浸漬温度においても $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{\max}^*$ はむしろ増加傾向を示している。浸漬試験 (Fig. 4.6) では、浸漬終了までに吸水が平衡状態に達しており、安定した状態に至っている。アラミド異形棒の表面の異形高さが比較的大きく $\bar{\tau}_{\max}^*$ 時のコンクリートとの付着作用はこ

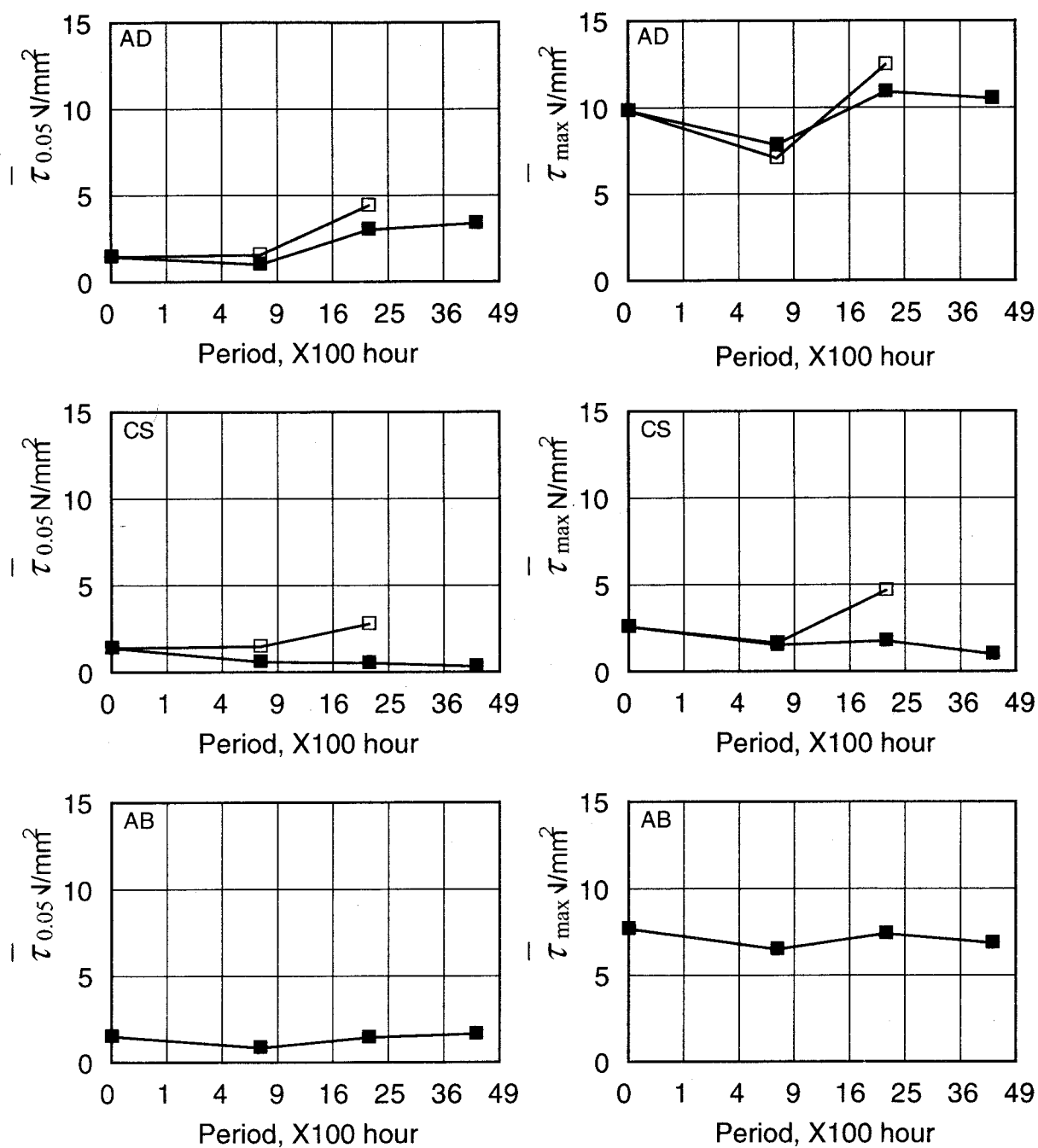


Fig. 4.14 Changes in $\bar{\tau}_{0.05}$ and $\bar{\tau}_{max}^*$ (Direct Immersion)
 (□, ■: Alkaline Solution 20, 60°C)

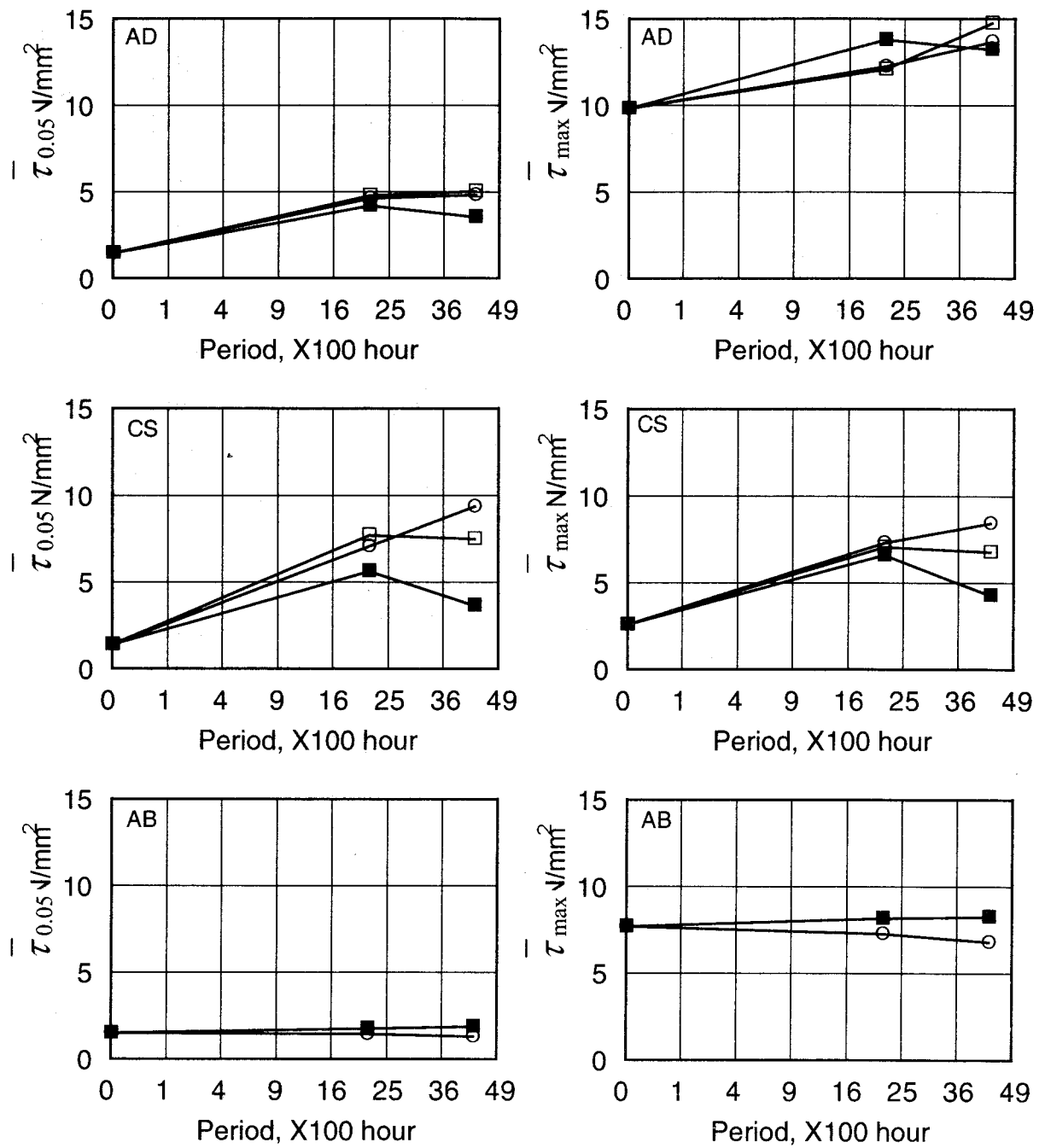


Fig. 4.15 Changes in $\bar{\tau}_{0.05}$ and $\bar{\tau}_{max}^*$ (in Concrete)
 (○: Outdoor Exposure □, ■: Alkaline Solution 20, 60°C)

の凹凸部での機械的な付着の割合が大きいと考えられること、また、アルカリ溶液中での質量変化が4%程度に留まっており劣化程度が小さいと考えられることから、 $\bar{\tau}_{0.05}$ 時、 $\bar{\tau}_{\max}^*$ 時ともに引抜きに対する付着抵抗力が確保されたと考えられる。また、膨潤により接触圧が増加し付着抵抗力に寄与したことも考えられる。

炭素より線では、浸漬温度が20℃の場合はアラミド異形棒と同様に $\bar{\tau}_{0.05}$ 、 $\bar{\tau}_{\max}^*$ は増加傾向を示しているが、浸漬温度が60℃の場合は $\bar{\tau}_{0.05}$ や $\bar{\tau}_{\max}^*$ が低下傾向にあり、特に $\bar{\tau}_{0.05}$ で顕著である。炭素より線では、付着長がよりのピッチより短い場合、よりによる本来の付着抵抗力を発揮できず、付着作用はより線を構成する7本の単線周囲の巻付け繊維における比較的小さな凹凸に依存している。浸漬試験(Fig. 4.6)では、浸漬温度が60℃の場合に棒材を構成する材料の加水分解による環境液中へ溶出が推察されたことから、 $\bar{\tau}_{0.05}$ や $\bar{\tau}_{\max}^*$ の低下は表層部の劣化の影響が顕著に表れたものと考えられる。

アラミド組紐の浸漬温度は60℃のみであるが、 $\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ にはいずれも大きな変化は認められない。浸漬試験(Fig. 4.6)では、アラミド異形棒と同様に吸水が平衡状態に達しており、安定した状態に至っている。アラミド組紐の表面の異形高さが比較的大きいことも合わせて、引抜きに対する付着抵抗力が確保されたと考えられる。

以上のように、浸漬試験において、60℃のアルカリ溶液中という促進環境下で溶出による質量減少を示した炭素より線以外は、連続繊維棒材をアルカリ溶液に直接浸漬した場合でも、付着抵抗力の低下は認められなかった。その他の連続繊維棒材あるいは浸漬環境において、20℃の水道水中でも吸水により質量増加が見られたが、現段階では平衡状態にあり、4.3で述べた微小硬度の測定結果にも見られるように、樹脂の劣化は付着に影響を与える程度には至っていないと考えられる。また、アルカリ溶液中に直接浸漬する方法は、環境剤が直接連続繊維棒材に接するという点で、コンクリート中に埋設して屋外に放置する方法やアルカリ溶液中に浸漬する方法よりも厳しい環境にある。その促進程度は今後明らかにする必要があるが、以上を総合すると、いずれの連続繊維棒材もアルカリ環境における付着の耐久性は高いと判断できる。一方、 $\bar{\tau}_{0.05}$ およびコンクリート強度による補正を行った $\bar{\tau}_{\max}^*$ を用いて、高い温度や溶液中のアルカリの存在による促進を考慮すると本研究における浸漬期間より長いある一定の期間においては、連続繊維棒材の溶出傾向($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の低下)や平衡吸水状態($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の)という劣化メカニズムの区別を推定できたものと考えられる。ただし、より長期において、平衡吸水状態以降の重量増加期¹³⁾に至る場合は、別途検討を行う必要がある。

5.4 自然環境および促進環境に暴露した連続繊維棒材

連続繊維棒材をコンクリート中に埋設したうえで屋外あるいは60℃のアルカリ溶液中に暴露した供試体について、P-d 曲線から求めた $\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}$ の経時変化を、横軸を

$\sqrt{\text{浸漬時間}}$ として Fig. 4.15 に示す。 $\bar{\tau}_{\max}$ は、5.3 と同様に $\bar{\tau}_{\max}^*$ に換算したものをを用いた。

いずれの連続繊維棒材あるいは環境下でも、 $\bar{\tau}_{0.05}$ や $\bar{\tau}_{\max}^*$ は非浸漬のものと同程度以上であり、屋外環境では低下することではなく、むしろ増加傾向であった。アラミド異形棒あるいは炭素より線を用い、6 ヶ月間の浸漬を行った供試体では若干の低下が認められ、特に炭素より線において上述の通り溶出傾向がある可能性もあるが、非浸漬の供試体を下回るものではない。

コンクリート中に埋設して屋外に放置する方法は最も実構造物の状況に近く、また、コンクリート中に埋設してアルカリ溶液中に浸漬する方法は、直接浸漬する方法と屋外に放置する方法の中間程度の劣化環境にあると考えられる。その劣化促進程度はより長期にわたる検討により今後明らかにする必要がある。

6. 本章のまとめ

本研究では、4 種類の連続繊維棒材と、それらに用いられている樹脂で作製した 2 種類の樹脂板を用いて耐アルカリ性を検討するとともに、アルカリ環境が連続繊維棒材とコンクリートの付着に与える影響を把握し、また、逆にその付着性状から連続繊維棒材の耐アルカリ性を検討するため、種々のアルカリ環境に暴露した供試体による片引試験を実施した。

連続繊維棒材や樹脂板を水道水やアルカリ溶液に浸漬すると、通常環境における数ヶ月のあいだにでも吸水による質量変化が発生した。中でも FRP である連続繊維棒材では、繊維と樹脂の界面が存在することから、界面への吸水が原因と見られる、樹脂板よりも大きな質量変化を示す場合が認められた。これらの質量変化には温度の影響が顕著であり、アルカリの存在の影響が認められる場合もあった。しかし、いずれの場合も質量変化率は数パーセント程度と小さく、また平衡吸水状態に至り安定するものがほとんどであった。そしてその結果、微小硬度やコンクリートとの付着性状の経時変化は顕著ではなかった。ただし、本研究の試験期間内で平衡吸水状態に至っていない連続繊維棒材や、促進環境下で溶出により質量が減少し、コンクリートとの付着性状にも若干の変化が認められたものも存在し、また、平衡吸水状態以降の挙動は明らかになっていない。このことから、さらに長期の検討が必要であることが確認される。

本研究の試験範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 連続繊維棒材に用いられる樹脂で作製した樹脂板を、水道水とアルカリ溶液中に 3 ヶ月まで浸漬した結果、温度による促進効果が認められ支配的であった。いずれの樹脂板も環境液による差は見られず、樹脂単体の場合には、アルカリ劣化と思われる質量変化は見られなかった。また、質量変化率も 3% 以下であった。

- (2) 連続繊維棒材を、水道水中とアルカリ溶液中に 5 ヶ月まで浸漬した結果、樹脂板より質量変化率が大きくなる場合が認められた。比較的薄い表面樹脂部分への環境剤の浸入と、それに続く繊維・樹脂の界面あるいは内部に存在する空隙への浸入が生じたためと考えられる。また、アルカリ溶液中では、水道水中の場合には見られない質量減少あるいは増加を示す棒材がみられた。アルカリにより加水分解が促進され、環境液への溶出、きれつ発生による内部への環境液の浸入の加速、あるいは棒材表面へのアルカリ成分の収着といった劣化機構が推察される。
- (3) 樹脂板と連続繊維棒材の表面および断面樹脂部の微小硬度の測定を行った結果、樹脂の種類により微小硬度に差が見られ、また繊維と樹脂界面の領域では若干微小硬度が小さい場合が認められた。しかし、アルカリ溶液中での質量変化の測定において、アルカリによる劣化と思われる質量変化を示した連続繊維棒材も含め、表面や断面樹脂部の微小硬度はほとんど変化せず、微小硬度に現れる程度の劣化は起こっていない。
- (4) 自由端変位が 0.05mm など比較的小さい時に発生する平均付着応力 $\bar{\tau}_{0.05}$ には、連続繊維棒材の表面に存在する樹脂の変形の影響が大きく、コンクリートの変形の影響が小さい。このため、連続繊維棒材そのものの変状を片引試験により評価するときには、この平均付着応力にも着目することが有効である。
- (5) 連続繊維棒材を、直接アルカリ溶液中に 5 ヶ月まで浸漬した結果、60℃で浸漬を行った場合で、棒材の表層部のアルカリ劣化による溶出が原因と思われる付着指標の低下傾向を示すものがみられた。一方、連続繊維棒材をあらかじめコンクリート中に埋設し、6 ヶ月まで自然環境へ暴露あるいはアルカリ溶液中に浸漬した結果、6 ヶ月では付着指標に若干の低下傾向が認められる場合があるものの、すべての場合で非浸漬のものより低下することはなかった。これらの結果から、いずれの連続繊維棒材もアルカリ環境における付着の耐久性は高いと判断できる。
- (6) $\bar{\tau}_{0.05}$ およびコンクリート強度による補正を行った $\bar{\tau}_{\max}^*$ を用いて、連続繊維棒材の溶出傾向($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の低下)や平衡吸水状態($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の安定)という劣化メカニズムの区別を推定できたものと考えられる。

参考文献

- 1) 第3章.
- 2) 例えば, Gerritse, A.: Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment, Proc. of 1st Int'l. Conf. on ACMBS, pp.129-137, 1992.
- 3) 魚本 健人, 勝本 太: 各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.167-174, 1994.
- 4) 丸山 武彦: 炭素 繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1991.3.
- 5) 奥田 聡: プラスチックの耐食性とその試験・評価, 日刊工業新聞社, 1996.2.
- 6) 箕島 弘二: 新材料の疲労 5. FRP の疲労—水環境効果について—, 材料, Vol. 43, No. 492, pp.1174-1180, 1994.9.
- 7) 宮坂ほか: プラスチック事典, 朝倉出版, pp.106, 1992.3.
- 8) 日本材料学会: 第27回高分子材料セミナー資料, 1995.11.
- 9) Hull, D. (宮入 裕夫, 池上 浩三, 金原 勲 訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
- 10) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー88, 1996.9.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編, 1996.3.
- 12) 壹岐直之, 清宮理, 山田昌郎: コンクリート応力場と打設方向が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.503-508, 1996.
- 13) 樹脂ライニング工業会: 樹脂ライニング皮膜の劣化診断指針, 1996.5.

第5章 連続繊維棒材の引抜き荷重下での付着特性とその長期的性状

1. 本章の目的

連続繊維棒材では、コンクリートとの十分な付着を確保するために、より線状や組紐状に成形したり、繊維を巻き付けて異形化するなどの表面の粗面化が行われるのが一般的である。しかし、そのために表面形状が多様になり、加えて、連続繊維棒材は一般に繊維結合材に用いる樹脂で覆われており、樹脂のヤング係数がコンクリートのほぼ 1/10 程度と小さいことから、付着応力がどのように分布しているか、あるいは付着応力-すべり関係(τ - S 関係)の定量化など数値的なメカニズムの把握についてはまだ十分な研究がなされていないのが現状である。一方、樹脂は常温でも持続荷重に対して顕著なクリープ変形を示す場合が多いため、ひび割れを許容するコンクリート構造物では、使用状態における持続引抜荷重に対し、経時的な付着すべり(付着クリープ)が鋼材に比べて過大となり、部材の挙動に与える影響が大きくなる可能性がある。

本章では、現在までにいくつかの使用実績を有する炭素より線およびアラミド異形棒を対象として、定着長以下の種々の付着長での片引試験により、付着応力分布を実験的に求めるとともに、持続引抜荷重を片引で与える付着クリープ試験を実施し、ひび割れ面からの拔出しに相当する荷重端変位の経時変化について検討した。

2. 実験概要

実験は、種々の付着長とした片引試験と、片引試験において引抜荷重を持続的に与える付着クリープ試験からなる。いずれにおいても断面が $100 \times 100 \text{ mm}$ のコンクリートブロックを用い、炭素より線($\phi 7.5$)およびアラミド異形棒($\phi 6.0$)の 2 種類の連続繊維棒材を、断面の中央部に所定の付着長で埋め込んだ供試体とした。連続繊維棒材の諸元を **Table 5.1** に、それぞれの外観を **Fig. 5.1** に示す。なお、片引試験では、比較のため異形鉄筋 D6 も用いた。

コンクリートは目標強度を 30 N/mm^2 とした。示方配合を **Table 5.2** に示す。試験開始時のコンクリート強度は $30.0 \sim 34.5 \text{ N/mm}^2$ (平均 32.5 N/mm^2) であった。供試体は全て横打設(水平筋)とし、片引試験、付着クリープ試験ともに、コンクリートの割裂補強用に鋼製スパイラル筋をコンクリートブロック全長にわたって配置した。供試体一覧を **Table 5.3** に示す。

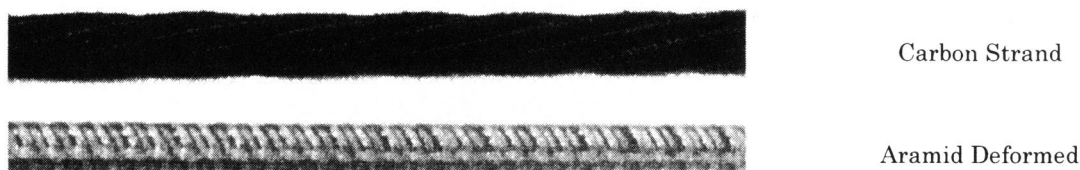


Fig. 5.1 FRP Bar

Table 5.1 FRP Bars

| FRP Bar | Resin | Nominal Diameter D (mm) | Nominal Perimeter (mm) | Nominal Area (mm ²) | Tensile Strength* (kN/mm ²) | Elastic Modulus (kN/mm ²) |
|----------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Carbon Strand (CS) | Epoxy Resin | 7.5 | 19.5 | 30.4 | 2.30 | 139.2 |
| Aramid Deformed (AD) | Vinyl Ester Resin | 6.0 | 18.8 | 28.3 | 1.76 | 52.9 |

* A test result for carbon strand, a guaranteed value for aramid deformed.

Table 5.2 Mix Proportion of Concrete

| Target Strength f_{cr} (N/mm ²) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit mass (kg/m ³) | | | | WRA (cc/m ³) |
|--|-------------|------------|---------|---------|---------|--------------------------------|-----|-----|-----|--------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G | |
| 30 | 15 | 8±1 | 4 | 62 | 49 | 181 | 292 | 865 | 917 | 730cc |

2.1 片引試験

自由端変位が発生する引抜荷重を付着長ごとに得るため、Table 5.3に示すように、炭素より線およびアラミド異形棒に対しては 6 種類、異形鉄筋に対しては 4 種類の付着長で試験を行った。これらのうち最大の 400mm の付着長は、使用した両方の連続繊維棒材をほぼ破断荷重程度まで定着できる長さである。

載荷状況をFig. 5.2に示す。静的な漸増引抜荷重を与え、約 500N ごとに、以下の測定を行った。

- (1) 引抜き荷重: センターホール型ロードセル(容量 100kN)で測定した。

- (2) 荷重端変位: 変位計(容量 10mm)で測定した.
- (3) 自由端変位: 電気出力付きダイヤルゲージ(容量 30mm)で測定した.

炭素より線およびアラミド異形棒の試験では, 自由端変位がおよそ 10mm になるか, または保証破断荷重に達した時点, 異形鉄筋では降伏荷重に達した時点以降に測定を終了した. なお連続繊維棒材は全て破断しなかった.

2.2 付着クリープ試験

所定の持続引拔荷重を片引で与えることとし, 200 および 300mm の 2 種類の付着長で試験を行った. 持続引拔荷重は, Table 5.1 から得られるそれぞれの連続繊維棒材の破断荷重の 10 および 20%にあたる荷重とした. これらは, 先行して行った片引試験より, 自由端変位が現れないことを確認した荷重レベルであるが, 20%時の棒材引張応力は普通鉄筋の降伏強度を上回る. したがって, 弾性係数が鉄筋に比べ小さいことを考慮すれば, ひび割れ幅制御の観点から, ひび割れ幅の限界値が通常の 2 倍程度に与えられると想定した場合の荷重と比べても同程度以上の大きな荷重となっていると考えられる.

供試体は, 定着具が不要となること, および, 同一の持続引拔荷重を与える 2 つの供試体を容易に作成できる利点から, 棒材の両端に同一のコンクリートブロックを打設したダンベル型とした. 載荷状況を Fig. 5.3 に示す. 持続引拔荷重の載荷は室内(気温 10~30℃, 湿度 30~90%)で行い, 所定の時間間隔にて以下の測定を行った.

- (1) 荷重端変位および自由端変位: ダイヤルゲージ(容量 5~30mm)を, それぞれ棒材あるいはコンクリートブロックに固定して測定した.
- (2) 実験室内の気温および相対湿度: 測定時の気温および相対湿度を, 測定から測定の間に履歴した最大および最小の値とともに測定した.
- (3) 引抜き荷重: 破断荷重の 20%にあたる大きいほうの荷重を与える供試体を含むいくつかの供試体について, センターホール型ロードセル(容量 100kN)で測定した.
- (4) コンクリートブロックの軸方向の長さ変化: 付着長が 300mm の供試体について, 検長 250mm のコンタクトゲージを用いて表面上で測定した.

以上の測定は, 約 18,000 時間(約 750 日)まで継続した.

Table 5.3 Specimens

| Bond Length | | FRP Bar | Number of Specimens | | |
|-------------|------|-----------------|---------------------|---------------------|-------|
| (mm) | (×D) | | Pull-out Test | Pull-out Creep Test | |
| | | | | 10% | 20% |
| 64 | 8.5 | Carbon Strand | 5 | — | — |
| | 10.7 | Aramid Deformed | 5 | — | — |
| 100 | 13.3 | Carbon Strand | 5 | — | — |
| | 16.7 | Aramid Deformed | 5 | — | — |
| 150 | 20.0 | Carbon Strand | 5 | — | — |
| | 25.0 | Aramid Deformed | 5 | — | — |
| 200 | 26.7 | Carbon Strand | 5 | 1(×2) | 1(×2) |
| | 33.3 | Aramid Deformed | 5 | 1(×2) | 1(×2) |
| | 33.3 | Steel Deformed | 5 | — | — |
| 300 | 40.0 | Carbon Strand | 5 | 1(×2) | 1(×2) |
| | 50.0 | Aramid Deformed | 5 | 1(×2) | 1(×2) |
| | 50.0 | Steel Deformed | 5 | — | — |
| 400 | 53.3 | Carbon Strand | 5 | — | — |
| | 66.7 | Aramid Deformed | 5 | — | — |
| | 66.7 | Steel Deformed | 5 | — | — |

* Sustained pull-out load:

Carbon Strand: 10% = 6.99kN(230N/mm²), 20% = 13.98kN(460N/mm²)

Aramid Deformed: 10% = 5.32kN(188N/mm²), 20% = 10.64kN(376N/mm²)

* A specimen for pull-out creep test consists of two concrete prisms at both ends of a bar.

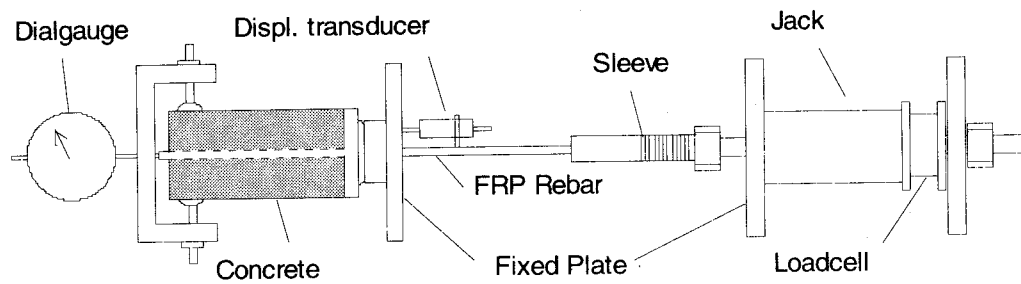


Fig. 5.2 Pull-out Test (Bare bar length: 500mm)

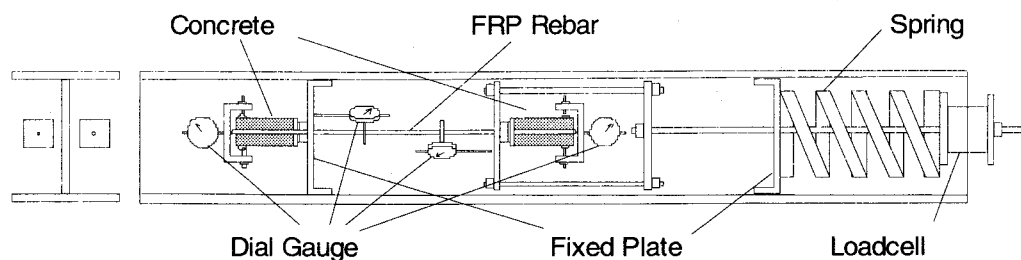


Fig. 5.3 Pull-out Creep Test (Bare bar length: 400mm)

3. 片引試験

3.1 引抜荷重—荷重端変位関係

実験より得られた引抜荷重—荷重端変位関係のうち，付着長が 400mm の供試体のものを棒材ごとに 5 体まとめて Fig. 5.4 に示す．また，異なる付着長による結果を棒材ごとに Fig. 5.5 に示す．荷重端変位は，荷重端から変位計設置位置までの棒材の引張弾性伸びを差し引けるように，以下によって求めたものである．

$$\frac{P(S+l)}{EA} + S = d \quad S = \frac{d - \frac{Pl}{EA}}{\frac{P}{EA} + 1} \quad \text{Eq. 5.1}$$

- ここに， P : 引抜荷重(kN)
 S : 荷重端変位(mm)
 l : 部材端からダイヤルゲージ位置までの距離(mm)
 E, A : 緊張材の弾性係数(kN/mm²)，断面積(mm²)
 d : ダイヤルゲージの値(mm)

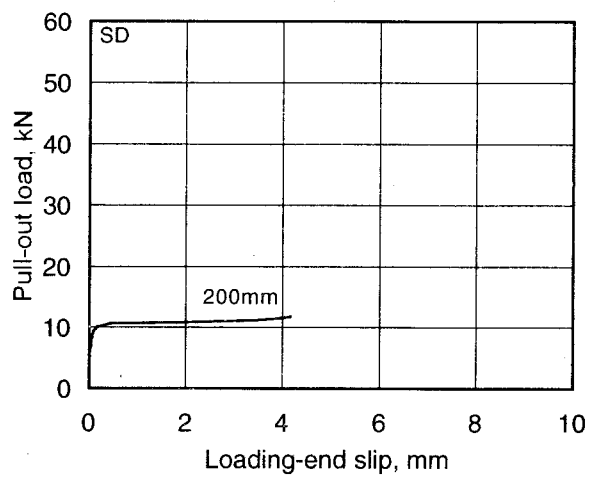
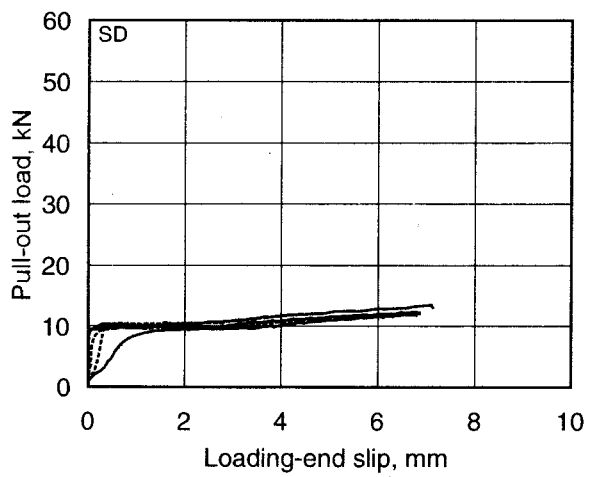
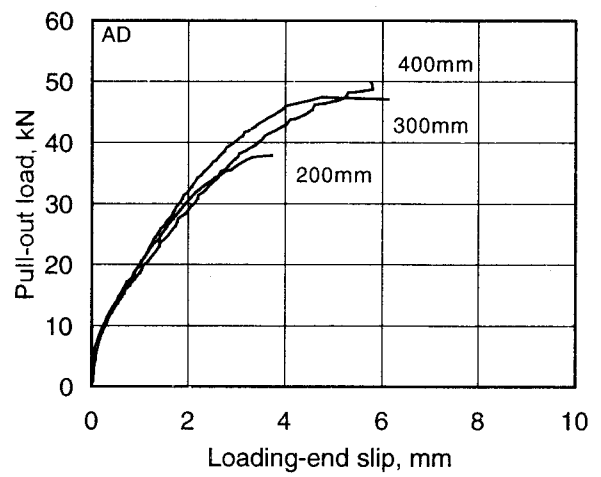
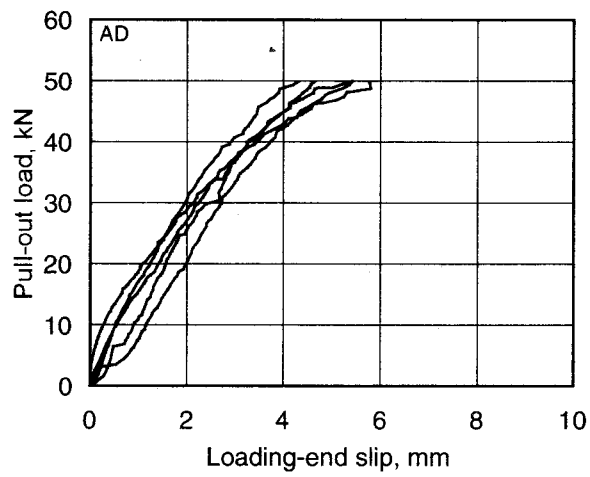
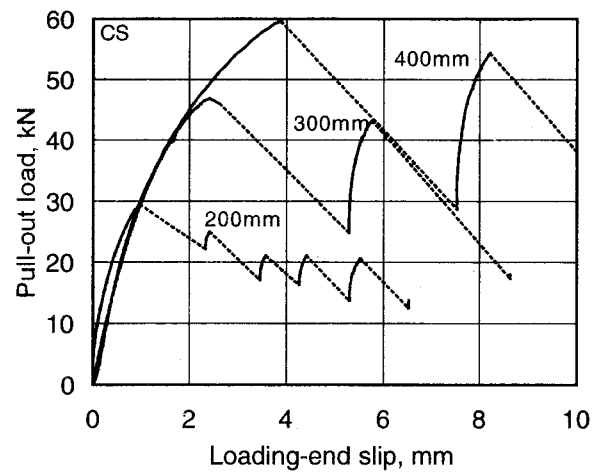
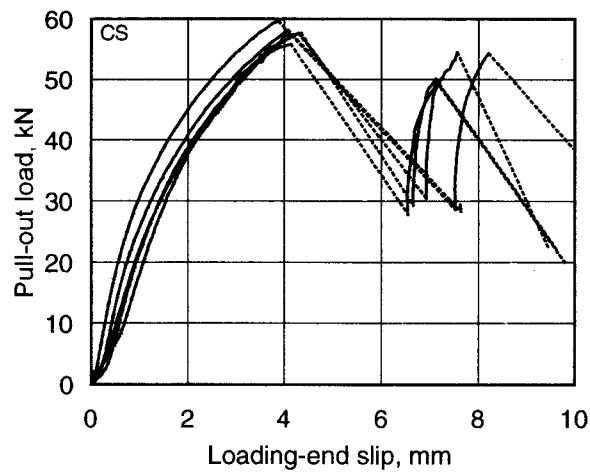


Fig. 5.4 Loading-End Slip
(Bond Length=400mm)

Fig. 5.5 Loading-End Slip

Fig. 5.4に示すように、引拔荷重が10kN程度での荷重端変位は、異形鉄筋では0.1mm程度であり、その後、降伏に至ったが、連続繊維棒材では0.3mm～1.1mm程度と比較的大きな値を示した。連続繊維棒材の表面に存在する樹脂のヤング係数が小さく、樹脂の変形により異形鉄筋より大きな荷重端変位が発生したものと考えられる。また、同じ引拔荷重における荷重端変位は、異形鉄筋<炭素より線<アラミド異形棒の順で大きい。炭素より線は、棒材全体での付着作用であるよりの凹凸と、よりを構成する単線表面に樹脂で固定された巻付け繊維によって機械的に付着しており、それらのうち前者が大きな割合で付着に寄与していると考えられる。一方、アラミド異形棒では、丸棒の表面に繊維が巻付けられており、その凹凸による機械的付着作用が大きな割合を占めていると考えられるが、巻付け繊維は軸方向の繊維および樹脂で固定されており、炭素より線より樹脂の影響を受けやすいものと考えられる。さらに、それぞれの棒材のヤング係数が異形鉄筋<炭素より線<アラミド異形棒の順で小さく、コンクリート中の棒材に伸びの差が発生し、荷重端変位に加算されることになる。以上のことから、荷重端変位の大小が決定されたものと考えられる。

最大引拔荷重以降、炭素より線では、回転を伴って引抜け、荷重端および自由端変位が急増するとともに、引拔荷重が大きく減少した。これに対し、アラミド異形棒ではなだらかな軟化を示す傾向にある。炭素より線では、付着に大きく寄与するよりの効果が限界を超えると、一時的に棒材とコンクリート界面における摩擦作用による付着力が主となって、コンクリート界面に形成された溝に沿って棒材が引抜けたものと考えられる。一方、アラミド異形棒は異形鉄筋と似た引抜け性状であるといえる。

以上のように引拔荷重—荷重端変位関係は棒材によって異なるものとなったが、Fig. 5.5に示すように、同一の棒材では、付着長の違いによらず、自由端変位が現れるまでの引拔荷重—荷重端変位関係はほぼ等しい。このことから、この段階では付着応力分布やすべり分布が等しいものと考えられる。

3.2 定着長

自由端変位は、炭素より線ではすべての付着長で生じたが、アラミド異形棒は付着長400mm(66.7D)で破断荷重に達した。Fig. 5.6に示すように、連続繊維棒材における自由端変位発生時の引拔荷重/破断荷重と付着長/公称直径の関係は、両棒材ともほぼ同様の傾向を示した。このことから、炭素より線においても、アラミド異形棒で自由端変位が見られなかった66.7D(500mm)の付着長とすることで破断荷重に達するものと推定できる。

3.3 付着応力分布

ある付着長 x_l の供試体において自由端変位が現れる時の軸力 P_{xl} は、それより長い付着長 x の供試体において自由端変位が現れるときの、自由端から x_l の位置におけるの軸力に等しい

と考えられる(Fig. 5.7). すなわち, Fig. 5.6は軸力分布を表しているといえる. さらに, Eq. 2.4によれば, 付着応力分布は, 軸力分布を用いて以下のように表される.

$$\tau_x = \frac{A}{u} \frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{1}{u} \frac{dP_x}{dx} \quad \text{Eq. 5.2}$$

ここに, τ_x : 位置 x での付着応力

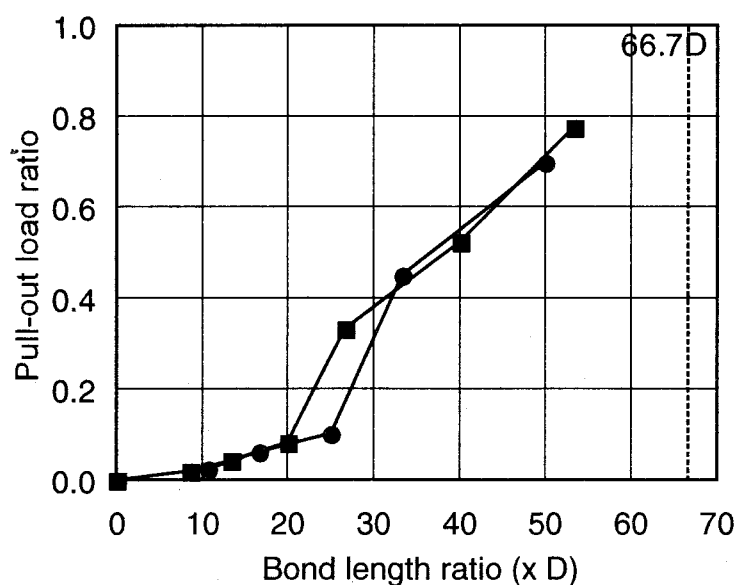


Fig. 5.6 Pull-out Load at Free-End Slip Initiation
(■: Carbon Strand, ●: Aramid Deformed)

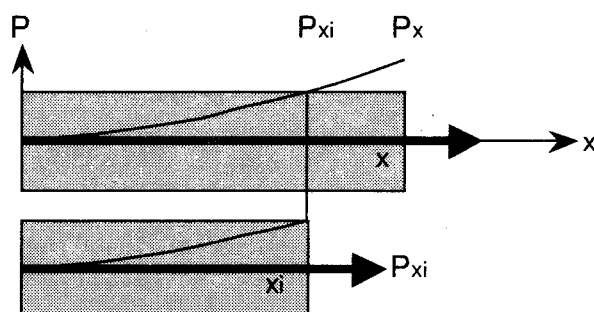


Fig. 5.7 Axial Force Distributions

A, u : 棒材の断面積および周長

P_x, σ_x : 位置 x での棒材の軸力および応力

Eq. 5.2 にしたがって、Fig. 5.6 に示した抜引荷重を付着長で微分して付着応力分布を求めた。得られた付着応力分布のうち、自由端変位が現れた最も長い付着長、すなわち、炭素より線では 400mm、アラミド異形棒では 300mm の供試体の自由端変位発生時の付着応力分布を Fig. 5.8 に示す。なお、引抜荷重は炭素より線で 54.2kN、アラミド異形棒で 37.2kN である。

炭素より線では最大付着応力が発生する位置の荷重端からの距離が長く、潜在的に持つ付着性能を十分に発揮するためにはアラミド異形棒以上の付着長が必要であることが分かる。また、アラミド異形棒が若干大きな最大付着応力を示している。しかし、両棒材ともほぼ同様の傾向の付着応力分布を示していると見られ、自由端側から 2 次関数的に付着応力が増加し、20D~30D の位置で急増して最大付着応力を発揮するとともに、それより荷重端側では減少し、主として摩擦力が作用する領域となるように付着応力分布をモデル化できるものと考えられる。これは、異形鉄筋の付着応力分布と大きく異なるものではない。

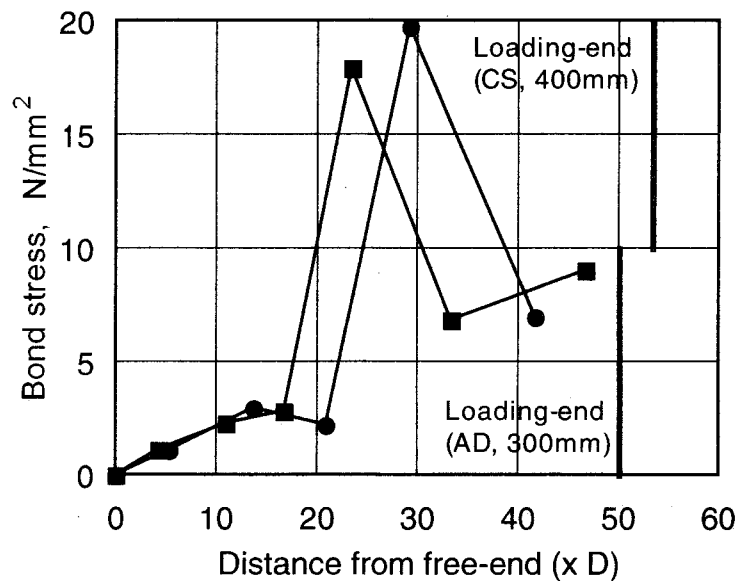


Fig. 5.8 Bond Stress Distribution (■: Carbon Strand, ●: Aramid Deformed)

4. 付着クリープ試験

4.1 荷重端変位増分の経時変化

各供試体の荷重端変位の経時変化を、持続引拔荷重載荷後の増分について、ダンベル型供試体の両側 2 つのコンクリートブロックでの値を平均して Fig. 5.9 に示す。荷重端変位増分は、片引試験と同様に、荷重端から変位計設置位置までの棒材の引張弾性伸びを差し引いたものである。いずれの供試体も時間の経過に伴い荷重端変位増分が増加しており、特に載荷後 24 時間程度で大きな変位が認められた。また、20%の荷重を与えた供試体の荷重端変位増分は、10%のもののおよそ 2 倍となっている。

その後、約 10,000 時間(約 1 年)までは増加を示しているが、それ以後は一定値に収束し安定する傾向にある。引拔荷重が一定であるため付着応力の積分値が変化しないことから、初期に発生していた局部的に大きな付着応力が原因でその個所に付着クリープが発生し、荷重端変位増分の増加となって現れるが、時間の経過とともに付着応力の分布が自由端側に進展して平均化され、付着長範囲の各所で付着クリープの発生が微小になる程度にまで付着応力が低下したものと考えられる。

4.2 荷重端変位増分の成分

Fig. 5.9 に示した荷重端変位増分には、種々の成分が含まれていると考えられる。それらは、持続引拔荷重の載荷中に生ずる付着応力や連続繊維棒材の軸力の分布の変化が引き起こすものであり、以下の成分が挙げられる。

(1) コンクリートに関わるもの

圧縮弾性変形、圧縮クリープ、乾燥収縮および口元での引張クリープ

(2) コンクリート中の連続繊維棒材に関わるもの

コンクリート内での引張弾性伸びおよびコンクリート内外での引張クリープ

(3) 連続繊維棒材のコンクリートとの付着に関わるもの

付着すべりおよび付着クリープ

ここで、付着クリープとは、同じ付着応力のもとで、すべりが経時的に増加していくことを表すものとしている。これらの成分はいずれも荷重端変位増分を増加させるものであり、Fig. 5.9 は、口元での相対変位としては最も種々の成分を含む最大値が測定されたものといえる。

なお、自由端変位については、最終測定時(約 18,000 時間)までに最大で 0.04mm 程度と有意な大きさの値が測定されていた。しかし、2 種類の付着長の供試体間で顕著な挙動の違い

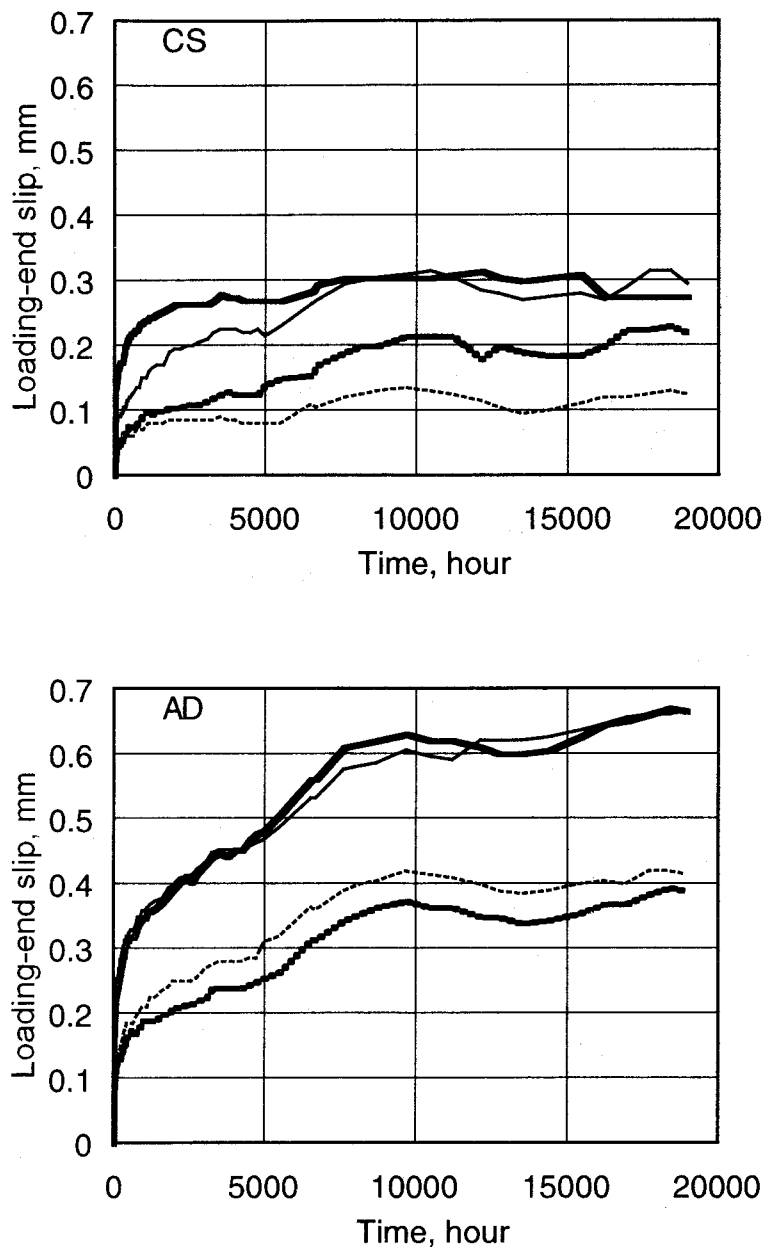


Fig. 5.9 Loading-end Slip Increment

(..., —: 10%, 20%, Bond Length = 300mm ..., —: 10%, 20%, Bond Length = 200mm)

が認められなかったことから、与えた持続引抜荷重により付着応力の分布が自由端に到達した結果として発生した自由端変位ではないと考えられる。したがって、自由端変位の測定値は、荷重端変位増分には含まれないとしてよいものと考えられる。

a) コンクリートブロックの収缩量

コンクリートブロックの軸方向の長さ変化は、上記の成分のうち(1)の合計を近似的に表せるものと考えられる。コンクリートブロック表面における検長 250mm 区間内での軸方向の

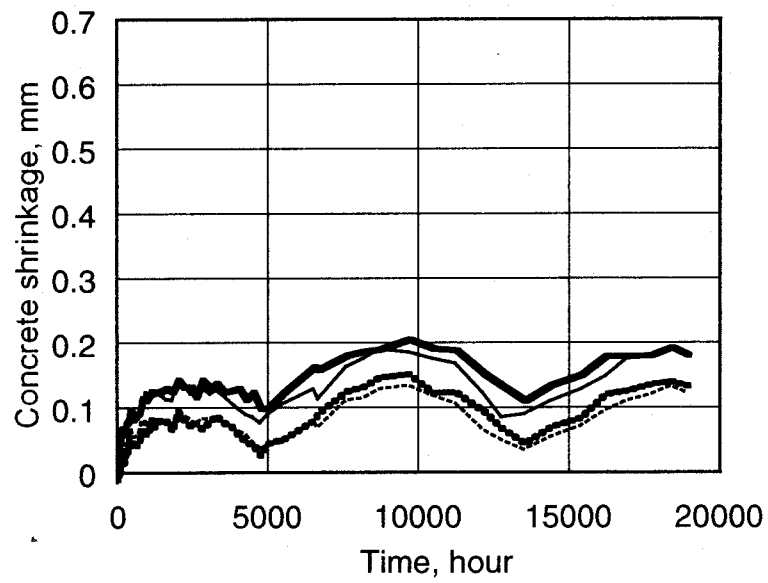


Fig. 5.10 Concrete Shrinkage (Bond Length = 300mm)
 (···, —: 10%, 20%, Carbon Strand ···, —: 10%, 20% Aramid Deformed)

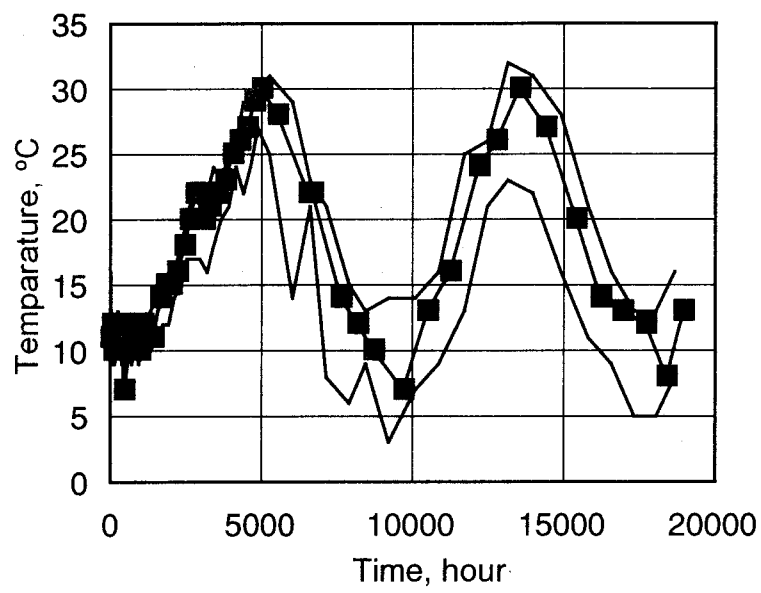


Fig. 5.11 Temperature
 (Upper and lower lines represent maximum and minimum respectively)

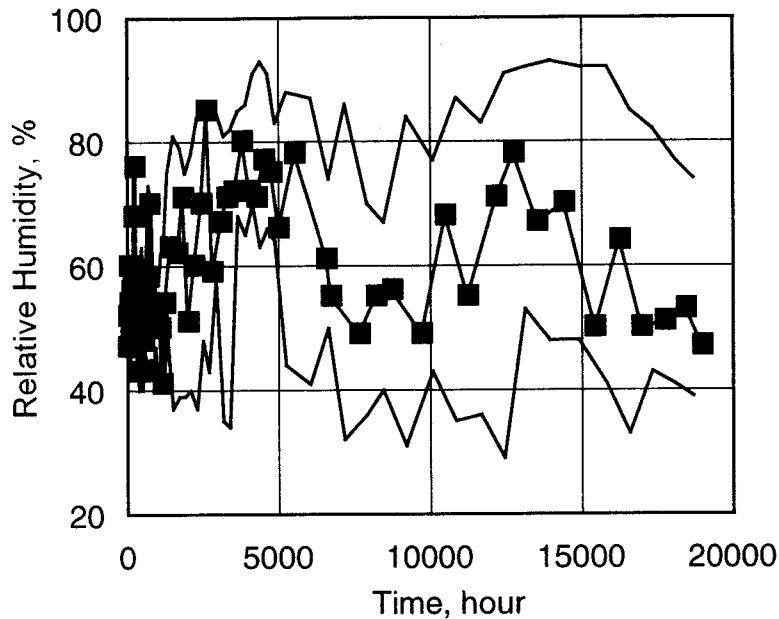


Fig. 5.12 Relative Humidity

(Upper and lower lines represent maximum and minimum respectively)

長さ変化を、全長 300mm に対する値に換算し、さらに収縮量として表したものをFig. 5.10に示す。また、測定時の実験室内の気温および相対湿度の平均および最大・最小値の経時変化を、それぞれFig. 5.11, Fig. 5.12に示す。持続引抜荷重の载荷開始は1月中旬である。コンクリートブロックの収縮量は気温の影響を受けて増減しており、最大で 0.2mm 程度にまで至っている。

コンクリートブロックの荷重端付近における付着応力の作用域では、棒材への引抜荷重が付着により伝達され圧縮状態にあるため、自由端付近より収縮量の増加は大きいと考えられる。すなわち、荷重端変位増分に与えるコンクリートブロックの収縮量の影響は、荷重端で大きく、自由端で小さくなると考えられる。しかし、収縮量が荷重端および自由端に均等に現れ、Fig. 5.10の 1/2 が荷重端変位増分の成分になると考えても、Fig. 5.9に示した荷重端変位増分の大きさと対比すれば、無視できない大きさであることが分かる。

b) 付着クリープ

Fig. 5.9のうち付着長 300mm の供試体の荷重端変位増分から、Fig. 5.10に示したコンクリートの収縮量の 1/2 を差し引き、荷重端変位増分において付着クリープが占める大きさについてのひとつの目安とした。荷重端変位増分が一定値に収束し安定しているとみられる最終測定時(約 18,000 時間)におけるその値を、荷重端変位増分に対する割合とともにTable 5.4に示す。なお、他の成分の存在、および0に述べたように自由端付近より荷重端付近で収縮量が大きいと考えられることから、いくぶん過大評価となっている。

Table 5.4 Approximate Estimation of Bond Creep
(Bond Length = 300mm, 18,000hours)

| FRP Bar | Sustained Load (%) | Loading-End Slip Increment (mm) | Concrete Shrinkage (mm) | Bond Creep (mm) (%)* |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Carbon Strand | 10 | 0.230 | 0.071 | 0.159 (69.1) |
| | 20 | 0.274 | 0.097 | 0.177 (64.6) |
| Aramid Deformed | 10 | 0.394 | 0.067 | 0.328 (83.1) |
| | 20 | 0.670 | 0.097 | 0.573 (85.5) |

* Ratio of bond creep to loading-end slip increment.

炭素より線よりアラミド異形棒で付着クリープが大きく、また、付着クリープが荷重端変位増分に占める割合も大きくなっている。3.1で述べたように、炭素より線では棒材全体での付着作用であるよりの凹凸の付着作用が大きい、アラミド異形棒では巻付け繊維の凹凸による付着作用大きく、炭素より線より樹脂の影響を受けやすいものと考えられる。すなわち、これらの棒材の付着クリープには、常温でもクリープ変形しやすい樹脂の影響が現れたものと考えられる。また、そのため、連続繊維棒材の付着クリープは、異形鉄筋や PC 鋼より線のものよりも大きくなっていることが推察される。

4.3 連続繊維棒材を用いたコンクリート部材における付着クリープの影響

以上のように、いずれの棒材においても、荷重端変位増分に占める付着クリープの割合は大きく、Table 5.4によれば、過大評価であるものの、コンクリートの収縮量と同程度以上である。したがって、初期のひび割れ幅を制限する観点からは与えた持続引抜荷重が比較的大きなものであることを考慮しても、部材の長期経過後のひび割れ幅やたわみを検討する際に、付着クリープの影響を考慮する必要があるといえる。

ひび割れ幅やたわみの限界値は、部材に要求される性能に基づいて決定される。これらのうち、ひび割れ幅については、鋼材を用いる既往の部材においての鋼材腐食による部材の性能低下の観点からは、連続繊維棒材は鋼材のような早期の腐食を生じないため、鋼材を用いた部材よりも大きな限界値が採用できるものと考えられる。しかし、付着クリープの値を 2 倍することによりひび割れ幅増分の成分になると考えると、付着クリープのみでも、炭素より線で 0.30~0.35mm 程度、アラミド異形棒では 0.60~1.15mm 程度となり、不安感や美観に感ずる性能の観点²⁾に基づく限界値に近い値あるいは上回る値となっている。また、鋼材を併用する場合では、これらの付着クリープによるひび割れ幅は許容することはできない。加えて、たわみや振動への影響も大きいと考えられ、疲労が与えられる部材では付着クリープはさらに増加し、その結果、長期経過後のひび割れ幅やたわみはさらに増加するものと予想

される。

以上のことから、連続繊維棒材をコンクリート部材に用いる場合は、使用状態でひび割れを発生しない程度にまで抑制し、連続繊維棒材の引張応力の増分を制限することで、付着クリープが微小となるように設計することが必要であると考えられる。そのためには、RCのように非緊張で用いる場合は、ひび割れ発生後も引張応力を制限できるよう連続繊維棒材の配筋量を多くすることが考えられる。また、コストの点から配筋量を制限する場合は、PCのように緊張して用いるとともに、フルPCにすることが考えられる。

5. 本章のまとめ

炭素より線およびアラミド異形棒を対象として、定着長以下の種々の付着長での片引試験を実施するとともに、持続引拔荷重を片引で与える付着クリープ試験を実施し、ひび割れ面からの拔出しに相当する荷重端変位の経時変化について検討した。

連続繊維棒材は、ヤング率が鋼材より小さいことから、RC 曲げ部材の補強筋として用いると、補強筋量によっては静的な荷重下でもひび割れやたわみが大きくなる。そのため、PC 用緊張材として用いることが主として考えられてきた。本研究で用いた炭素より線およびアラミド異形棒では、18,000 時間程度までの持続引拔荷重下において、付着クリープによる顕著な荷重端変位の増加が認められ、長期性状を考慮しても、同様に PC 用緊張材としての利用が推奨される結果となった。

本研究から得られた結果をまとめて結論とする。

- (1) 同じ引拔荷重における荷重端変位は、表面形状、表面に存在する樹脂およびヤング率の影響により、異形鉄筋(D6)<炭素より線($\phi 7.5$)<アラミド異形棒($\phi 6.0$)の順で大きい。最大引拔荷重以降では、炭素より線はコンクリート界面に形成された溝に沿って急激な引抜けを示し、アラミド異形棒は異形鉄筋と似た引抜け性状であった。ただし、同一の棒材では、付着長の違いによらず、自由端変位が現れるまでの引拔荷重－荷重端変位関係はほぼ等しく、この段階では付着応力分布やすべり分布が等しいものと考えられる。
- (2) 炭素より線およびアラミド異形棒において、自由端変位発生時の引拔荷重/破断荷重と付着長/公称直径の関係は、両棒材ともほぼ同様の傾向を示した。両棒材の定着長は、66.7D 程度であった。
- (3) 炭素より線およびアラミド異形棒の付着応力分布より、炭素より線では最大付着応力が発生する位置の荷重端からの距離が長く、潜在的に持つ付着性能を十分に発揮するためには、アラミド異形棒以上の付着長が必要であることが示された。しかし、両棒材ともほぼ同様の概形であり、また、異形鉄筋の場合に見られるものと同様であった。

- (4) 炭素より線およびアラミド異形棒においては、いずれも荷重端変位増分の増加は持続引抜荷重載荷後 24 時間で顕著に現れた。また、保証破断荷重の 20%の持続引抜荷重を与えた場合の荷重端変位増分は、10%のもののおよそ 2 倍となった。その後、約 10,000 時間(約 1 年)までは増加を示しているが、それ以後は一定値に収束し安定する傾向にある。
- (5) 荷重端変位増分からコンクリートの収縮量の 1/2 を差し引いた値を付着クリープの目安として評価すると、炭素より線よりアラミド異形棒で付着クリープが大きく、また、付着クリープが荷重端変位増分に占める割合も大きくなり、表面に存在する樹脂の変形が影響したものと考えられる。
- (6) 連続繊維棒材を用いた部材の長期経過後のひび割れ幅やたわみを検討する際に、付着クリープの影響を考慮する必要がある。しかし、ひび割れ幅、たわみあるいは振動の制限値や、疲労を考慮すれば、連続繊維棒材をコンクリート部材に用いる場合は、使用状態でひび割れを発生しない程度にまで抑制し、連続繊維棒材の引張応力の増分を制限することで、付着クリープが微小となるように設計することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 町田 恭一, 楨谷 栄次, 入澤 郁雄: 新補強材の付着特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.827-830, 1991.6.
- 2) 土木学会: 連続繊維棒材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー72, pp.35-37, 1992.4.
- 3) 水谷 淳, 則武 邦具, 本間 秀世, 浅井 洋: AFRP 異形ロッドの定着機構について, 土木学会第 44 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部/V-249, pp.552-553, 1989.10.
- 4) 本間 雅人, 丸山 武彦, 榎本 剛, 島 弘: CFCC の付着応力—すべり関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.823-826, 1991.6.
- 5) 谷垣 正治, 岡本 直, 蓮尾 孝一: 繊維補強材の付着性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.831-836, 1991.
- 6) 菅 哲治, 島 弘, 本間 雅人: 片引試験による連続繊維補強材の局部付着応力—すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.859-864, 1993.
- 7) 鈴木 計夫, 大野 義照, 李 振宝, 太田 崇士: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力—すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.51-56, 1992.6.
- 8) 李 振宝, 大野 義照, 鈴木 計夫: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力—すべり関係の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第 15 巻 第 2 号, pp.123-128, 1993.
- 9) 李 振宝, 大野 義照, 鈴木 計夫: RC はりの長期ひび割れ幅に及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.407-412, 1994.
- 10) 鈴木 計夫, 大野 義照, 李 振宝, 鍋沢 斤吾: RC 片持はりの長期たわみと付着解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.57-62, 1992.6.
- 11) 佐藤 良一, 氏家 勲, 湊 英一, 北条 泰秀: 長期の RC 曲げ部材における変形と付着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.63-68, 1992.
- 12) 佐藤 和弘, 榊田 桂寛, 棚野 博之, 鹿毛 忠継: 連続繊維補強筋を用いたコンクリートはりの長期たわみ挙, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.993-998, 1993.
- 13) 谷垣 正治, 岡本 直, 松原 澄行, 蓮尾 孝一: 組紐状アラミド連続繊維筋を用いた PPC 梁の長期載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.911-916, 1993.
- 14) 藤井 栄: 鉄筋コンクリートにおける付着・定着機構とその部材性能に及ぼす影響に関する研究, 京都大学博士論文, 1992.1.

- 15) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力—すべり—ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.2.
- 16) 山田 圭一, 島 弘, 原口 華世子: 鉄筋とコンクリートの付着特性に及ぼす荷重の繰返しと時間の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.133-138, 1991.
- 17) L. E. Nielsen 著, 小野木 重治 訳: 高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人, 1976.11.
- 18) L. C. Hollaway: Polymers and polymer composites in construction, Thomas Telford Ltd., 1990.

第6章 連続繊維補強材の定着付着および曲げ付着とその長期性状

1. 本章の目的

連続繊維補強材をプレテンション用 PC 緊張材として有効に用いるためには、定着付着性状、および、ひび割れ面からの拔出し性状に影響する曲げ付着性状を明らかにするとともに、それらの長期性状を定量化し、伝達長およびひび割れ幅の長期予測を行う必要がある。特に、連続繊維補強材では軸直角方向の変形に関してはほとんど分かっていないため、これらの付着性状が鋼材と異なることが考えられる。

また、連続繊維補強材では、強度のほとんどを発揮する連続繊維が、樹脂を介してコンクリートと付着している状態になる。連続繊維補強材を収束しているとともにそれを覆っている繊維結合材は、一般にエポキシやビニルエステルなどの樹脂である。樹脂は一般に常温でも粘弾性的であり、持続荷重下においてはクリープや応力緩和を示す傾向が強い。この傾向は、作用荷重方向には、補強のために繊維を配し複合材料とする事により、ほぼ防げることが示されている。すなわち、繊維そのものの引張クリープはマトリクスである樹脂に比べて非常に小さいと考えられている。したがって、連続繊維補強材の引張クリープは比較的小さいものと予想される。しかし、上記のような連続繊維補強材のコンクリートとの付着を考える場合は、樹脂の性能が問題となる。このため、これらは定着付着、曲げ付着ともに、付着応力が持続的に作用する個所では樹脂のクリープの発生、それに伴う付着すべりの増大が懸念される。定着付着においては有効プレストレスの減少に、曲げ付着においてはひび割れ幅の増大やたわみの増大につながり、構造物の性能が低下する可能性が考えられる。

本章では、連続繊維緊張材としてアラミドより線、炭素より線、およびアラミドシートを対象とし、プレストレス導入中のコンクリートとの定着性状および導入後のその長期性状について検討し、 τ - S 関係として取りまとめるとともに、漸増曲げ荷重下におけるひび割れ面からの拔出し性状および持続曲げ荷重下におけるその長期性状について検討を行った。

2. 実験概要

幅×高さ×全長=100×200×1600mm のはり供試体に、Table 6.1に示す各種の緊張材を、棒材は有効高さ 150mm の位置に、連続繊維シートは下縁に配した。連続繊維棒材および連続繊維シートの外観をFig. 6.1に示す。コンクリートの目標強度はいずれの供試体に

においても同一であり、圧縮強度の平均値は 50.2N/mm^2 であった。コンクリートの示方配合を **Table 6.2** に示す。付着長は、両部材端に非定着長を設けることにより、 1380mm とした。

Table 6.1 FRP Tendons

| FRP Tendon | Symbol | Nominal Area (mm^2) | Rupture Load (kN) | Elastic Modulus (kN/mm^2) ¹ |
|---------------------------|--------|-----------------------------------|----------------------|--|
| Aramid Strand $\phi 12.4$ | AS | 97.9 | 177 | 53.0 |
| Aramid Braid $\phi 13$ | AB | 133 | 181 | 68.9 |
| Carbon Strand $\phi 12.5$ | CS | 103 | 161 | 140 |
| Steel Strand $\phi 12.7$ | SS | 98.7 | 188 | 191 |
| Aramid Sheet 100mm width | AFS | 28.6 | 70.6 | 116 |

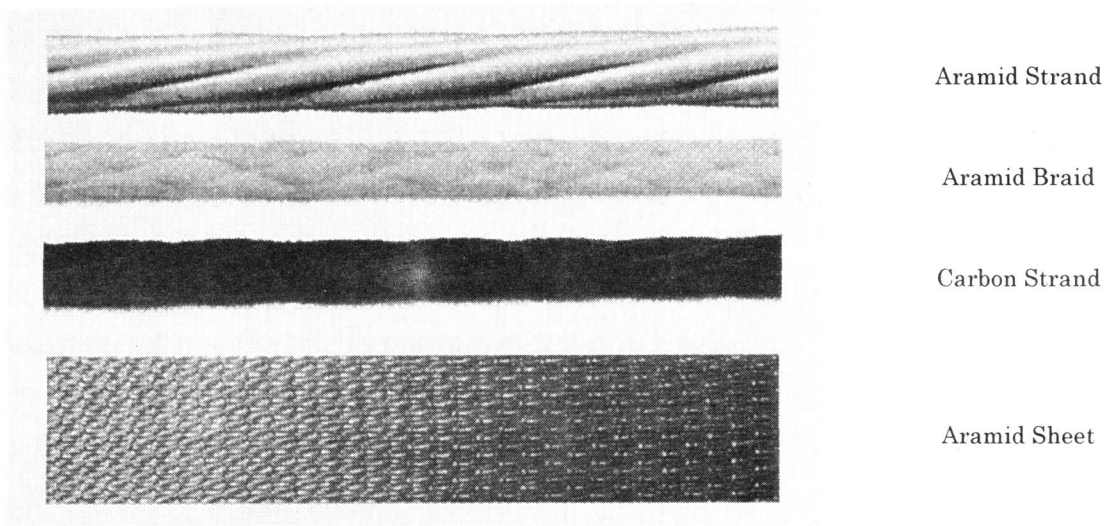


Fig. 6.1 FRP Bars and Fiber Sheet

Table 6.2 Mix Proportion of Concrete

| Target Strength f'_{cr} (N/mm^2) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit mass (kg/m^3) | | | | WRA (cc/m^3) |
|---|----------------|---------------|------------|------------|------------|-------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G | |
| 50 | 15 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 44 | 45 | 180 | 409 | 739 | 950 | 1023 |

2.1 定着試験

初期緊張力は、緊張材の破断荷重に対する割合が、棒材では 40 または 60%, 連続繊維シートでは 10 または 20%となる値とした。いずれの供試体もプレストレスを漸増的に導入し、導入時には以下の測定を行った。

- (1) 部材端変位: 導入端側について、ダイヤルゲージ(容量 30mm)により測定した。
- (2) 緊張材ひずみ: ひずみゲージ(検長 2mm)により測定した。
- (3) コンクリートひずみ: 緊張材高さ(棒材では下縁から 50mm, 連続繊維シートでは下縁から 10mm)において、ひずみゲージ(検長 30mm)により測定した。

また、導入後は、これらの経時変化を測定した。供試体一覧をTable 6.3に示す。連続繊維棒材および連続繊維シートを用いる供試体の概要をそれぞれFig. 6.2およびFig. 6.3に、緊張・導入状況をそれぞれFig. 6.4, Fig. 6.5に示す。連続繊維棒材は、鋼管スリーブと定着用膨張材を用いて定着した。連続繊維シートはFig. 6.6に示す定着具で定着した。定着状況をFig. 6.7に示す。

Table 6.3 Specimens (Transfer Test)

| Name | Tendon | Prestress Force | | σ_{ct} (N/mm ²) | σ_{ct}' (N/mm ²) | Number of Specimens |
|-------|-----------------------|-----------------|-------|---------------------------------------|--|---------------------|
| | | /Pu*(%) | (kN) | | | |
| AS40 | Aramid Strand | 40 | 70.8 | 8.85 | -1.77 | 3 |
| AS60 | φ12.4 | 60 | 106.2 | 13.6 | -2.71 | 1 |
| AB40 | Aramid Braid | 40 | 72.3 | 9.04 | -1.81 | 3 |
| AB60 | φ13 | 60 | 108.5 | 13.6 | -2.71 | 1 |
| CS40 | Carbon Strand | 40 | 64.4 | 8.05 | -1.61 | 3 |
| CS60 | φ12.5 | 60 | 96.6 | 12.1 | -2.42 | 1 |
| SS30 | Steel Strand φ12.7 | 30 | 56.4 | 7.05 | -1.41 | 1 |
| SS40 | | 40 | 75.2 | 9.40 | -1.88 | 2 |
| SS60 | | 60 | 112.8 | 14.1 | -2.82 | 1 |
| AFS10 | Aramid Sheet | 10 | 7.15 | 1.43 | -0.715 | 2 |
| AFS20 | 100mm width | 20 | 14.3 | 2.86 | -1.43 | 4 |

* Pu: Rupture load of each tendon.

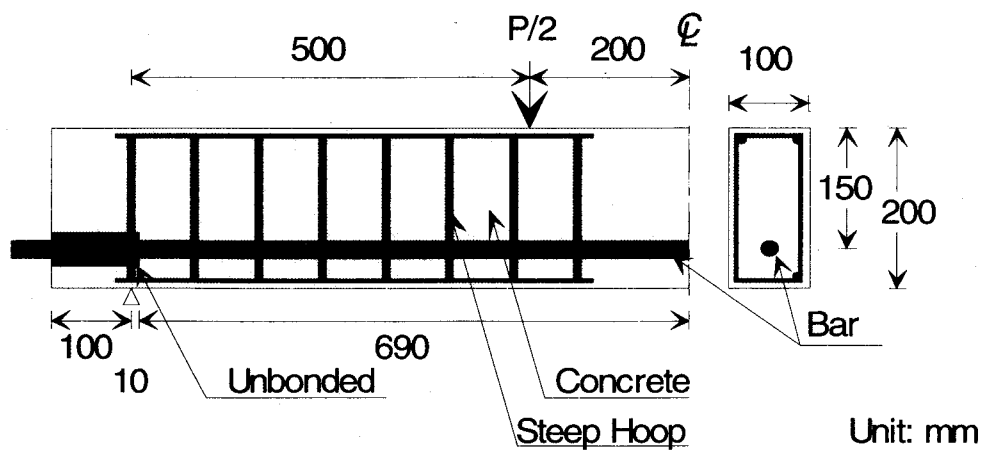


Fig. 6.2 Specimen for Bars (Transfer Test)

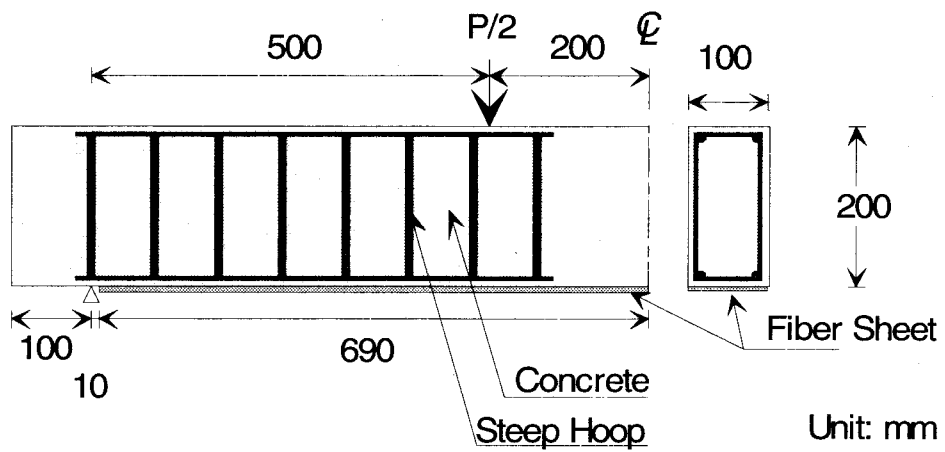


Fig. 6.3 Specimen for Fiber Sheets (Transfer Test)

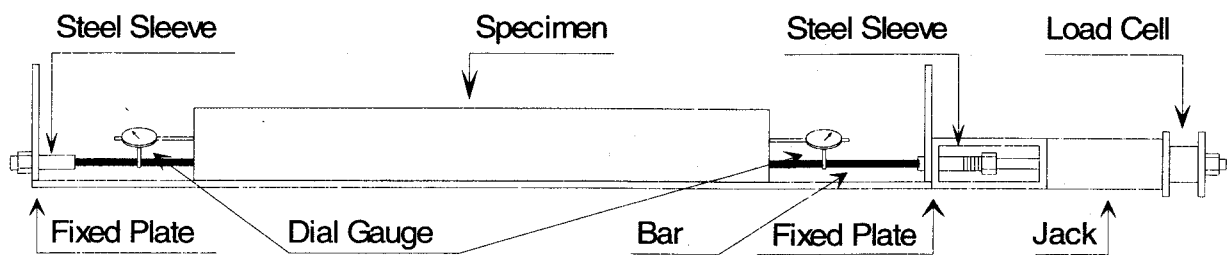


Fig. 6.4 Prestressing for a Bar (Transfer Test)

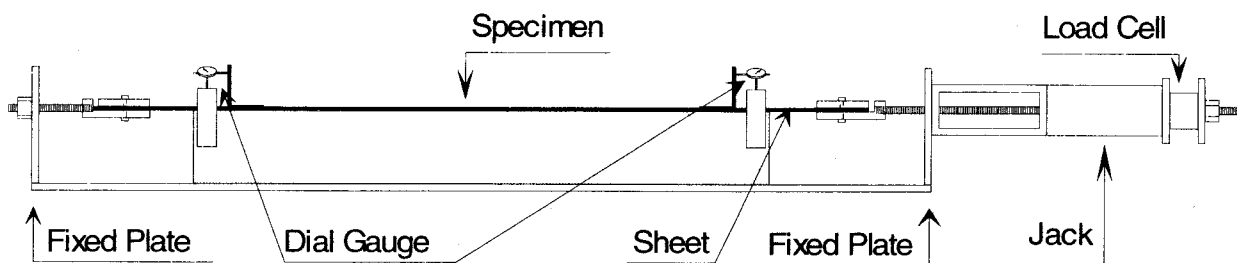


Fig. 6.5 Prestressing for a Sheet (Transfer Test)

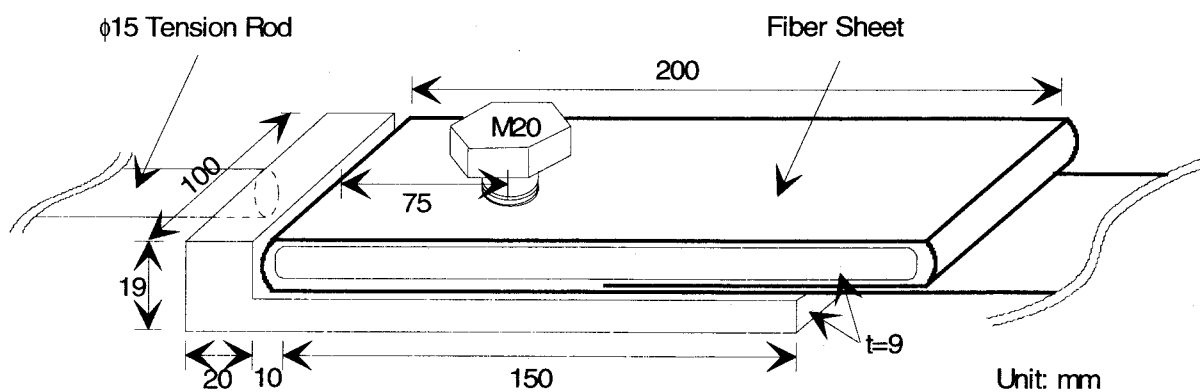


Fig. 6.6 Anchorage for a Sheet

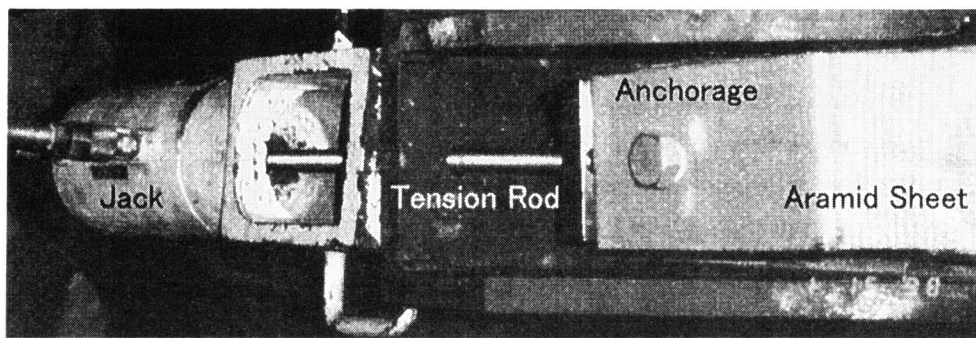


Fig. 6.7 Pretensioning of Aramid Sheet

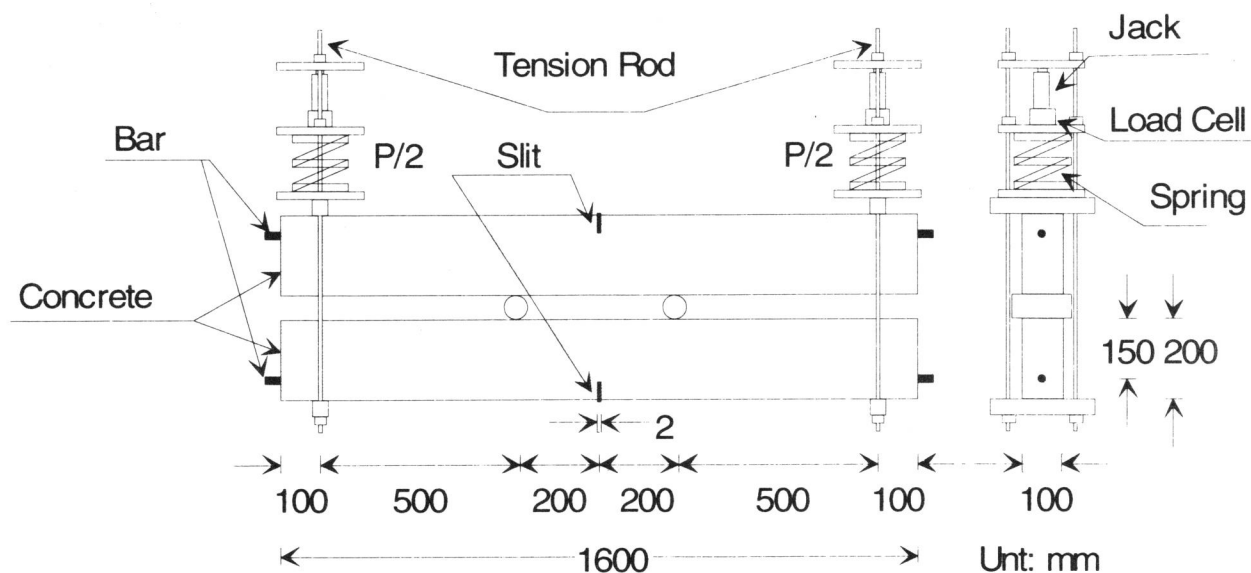


Fig. 6.8 Flexural Test (Loading)

2.2 曲げ試験

下縁中央部に、幅 2mm、高さ 50mm のスリットにより切欠きを設けた。初期緊張力は、緊張材の破断荷重に対する割合が、棒材では 40%となる値、連続繊維シートは非緊張とした。いずれの供試体も、プレストレス導入後、Fig. 6.8に示すように同一要因の供試体を 1 組として曲げ荷重を漸増的に载荷した。曲げ荷重は、計算による緊張材の軸力増分が破断荷重の 10 または 20%となるまで与え、载荷時には以下の測定を行った。

- (1) ひび割れ幅: 切欠き位置のひび割れ幅を, コンタクトゲージ(検長 100mm)により測定した.
- (2) 緊張材ひずみ: ひずみゲージ(検長 2mm)により測定した.
- (3) コンクリートひずみ: 緊張材高さ(棒材では下縁から 50mm, 連続繊維シートでは下縁から 10mm)において, ひずみゲージ(検長 30mm)により測定した.

また, 載荷後は曲げ荷重を持続的に与え, これらの経時変化を測定した. 供試体一覧をTable 6.4に示す.

Table 6.4 Specimens (Flexural Test)

| Name | Tendon | Prestress Force | | Prestress Force Increment | | Sustained Flexural Load (kN) | Number of Specimens |
|-------|---------------|-----------------|------|---------------------------|------|------------------------------|---------------------|
| | | (/Pu*) | (kN) | (/Pu*) | (kN) | | |
| AS41 | Aramid Strand | 0.4 | 70.8 | 0.1 | 17.7 | 35.0 | 2 |
| AS42 | φ12.4 | | | 0.2 | 35.4 | 43.6 | 2 |
| SS41 | Steel Strand | 0.4 | 75.2 | 0.1 | 18.8 | 47.7 | 2 |
| SS42 | φ12.7 | | | 0.2 | 37.6 | 58.4 | 2 |
| AFS01 | Aramid Sheet | 0** | 0** | 0.1 | 7.15 | 5.98 | 2 |
| AFS02 | 100mm width | | | 0.2 | 14.3 | 11.3 | 2 |

* Pu: Rupture load of each tendon. ** Aramid Sheet was not tensioned.

3. 定着試験

3.1 導入中の定着性状

a) 伝達長

ひずみの測定から求めた緊張材軸力の軸方向分布が, 打設前の軸力の 95%以上となる領域を軸力一定領域と見なして求めた伝達長と, 導入力(初期緊張力の開放分)の緊張材破断荷重に対する割合との関係を, 棒材についてFig. 6.9に示す. いずれも伝達長は導入力にほぼ比例している. それぞれの傾きをTable 6.5に示す.

同一導入力時の伝達長は, アラミドより線では初期緊張力が60%の場合に40%より短い, 炭素より線およびPC鋼より線では差は顕著でない. アラミドより線の弾性係数が炭素より線やPC鋼より線より小さいため, 初期緊張力の差で導入前の緊張材の径に現れる差が大きく, すなわち初期緊張力が大きく径の減少が大きい緊張材がコンクリートとの接触圧が大き

くなり、すべりが小さくなったためと考えられる。Fig. 6.9の直線回帰による導入直後の伝達長は、Table 6.6の値となる。いずれの連続繊維棒材についても、PC 鋼より線より伝達長は短い。

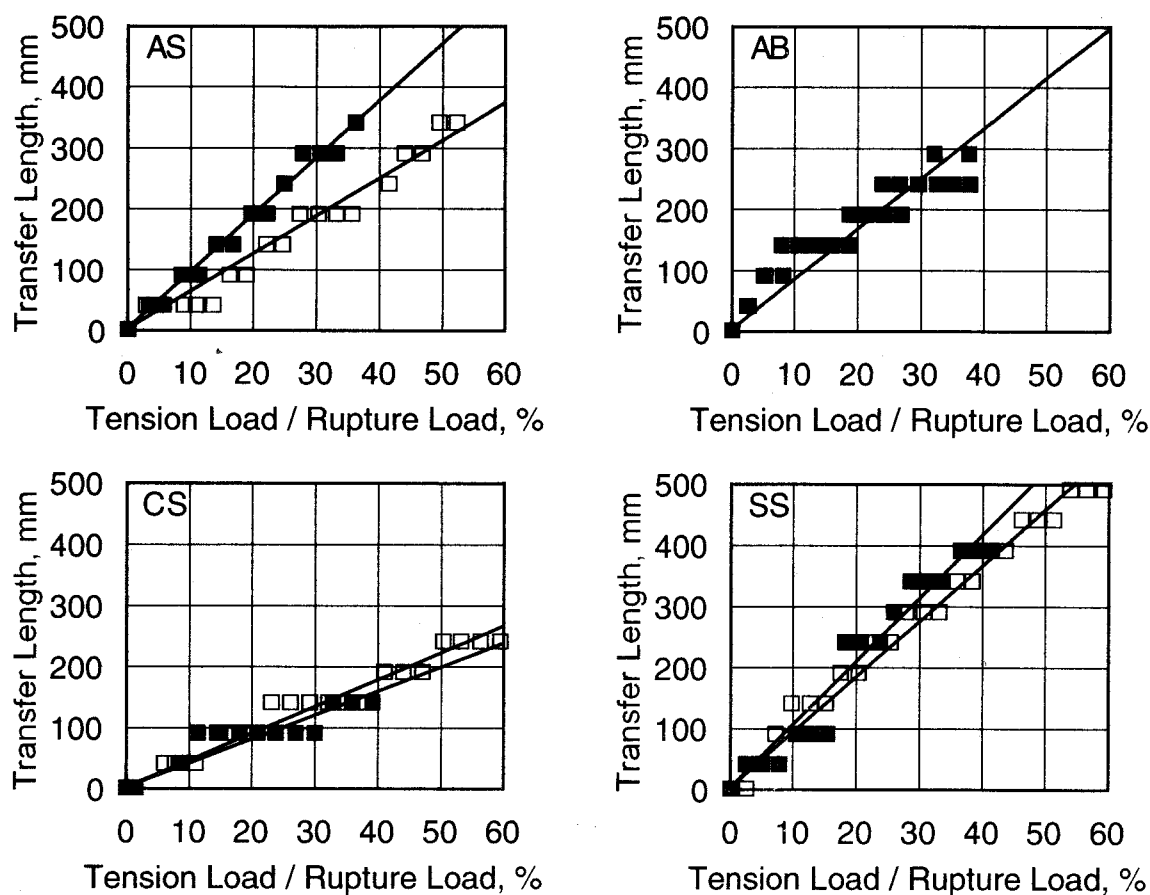


Fig. 6.9 Transfer Length (■: 40%, □: 60%)

Table 6.5 Transfer Length Gradient (Bars)

| Tendon | 40% ($\times 10^2 \text{mm}$) | 60% ($\times 10^2 \text{mm}$) |
|--------|---------------------------------|---------------------------------|
| AD | 6.19 | 9.36 |
| AB | 8.24 | — * |
| CS | 3.94 | 4.41 |
| SS | 10.3 | 9.09 |

* No data.

Table 6.6 Transfer Length just after Prestressing (Bars)

| Tendon | 40% (mm) | 60% (mm) |
|--------|--------------------|--------------------|
| AS | 374 (33.4 ϕ) | 371 (33.1 ϕ) |
| AB | 330 (25.4 ϕ) | — * |
| CS | 158 (13.9 ϕ) | 265 (23.2 ϕ) |
| SS | 412 (36.8 ϕ) | 545 (48.7 ϕ) |

* No data.

一方、アラミドシートでは、20%の初期緊張力を与えた供試体 4 体中の 2 体は、導入直後にコンクリートの付着を伴ってめくれ上がる状態で剥離した(Fig. 6.10). 与えた初期緊張力が棒材より小さい一方で、片面のみであるが付着面積が大きいにもかかわらず剥離したのは、アラミドシートの厚みにより面外方向に剥離(Peel)荷重が作用し、脆弱なモードで破壊したためと考えられる。

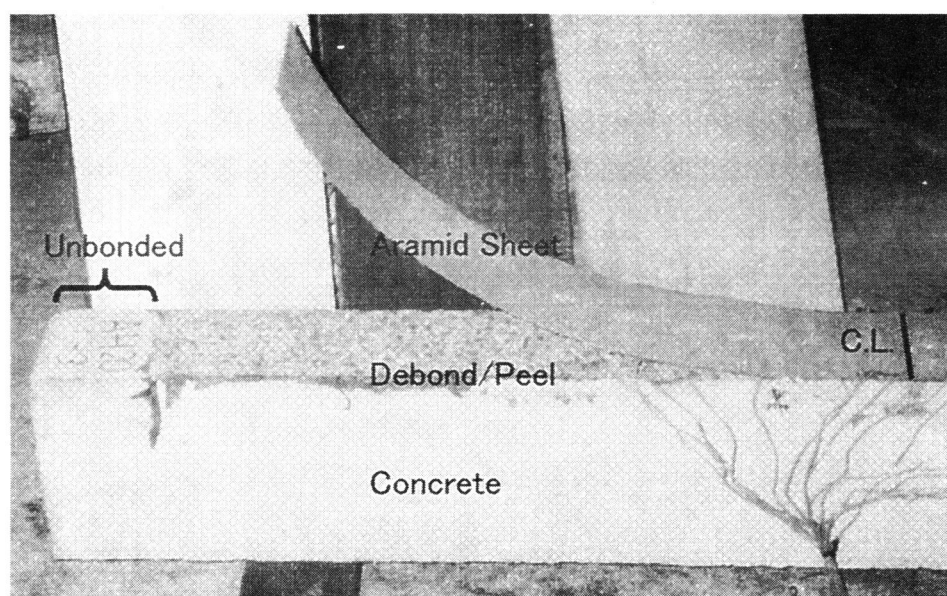


Fig. 6.10 Debond / Peel of Aramid Sheet

b) 部材端変位

各導入力時の棒材の部材端変位をFig. 6.11に示す. 部材端変位は、部材端から変位計設置位置までの棒材の引張弾性伸びを差し引けるように、以下によって求めたものである。

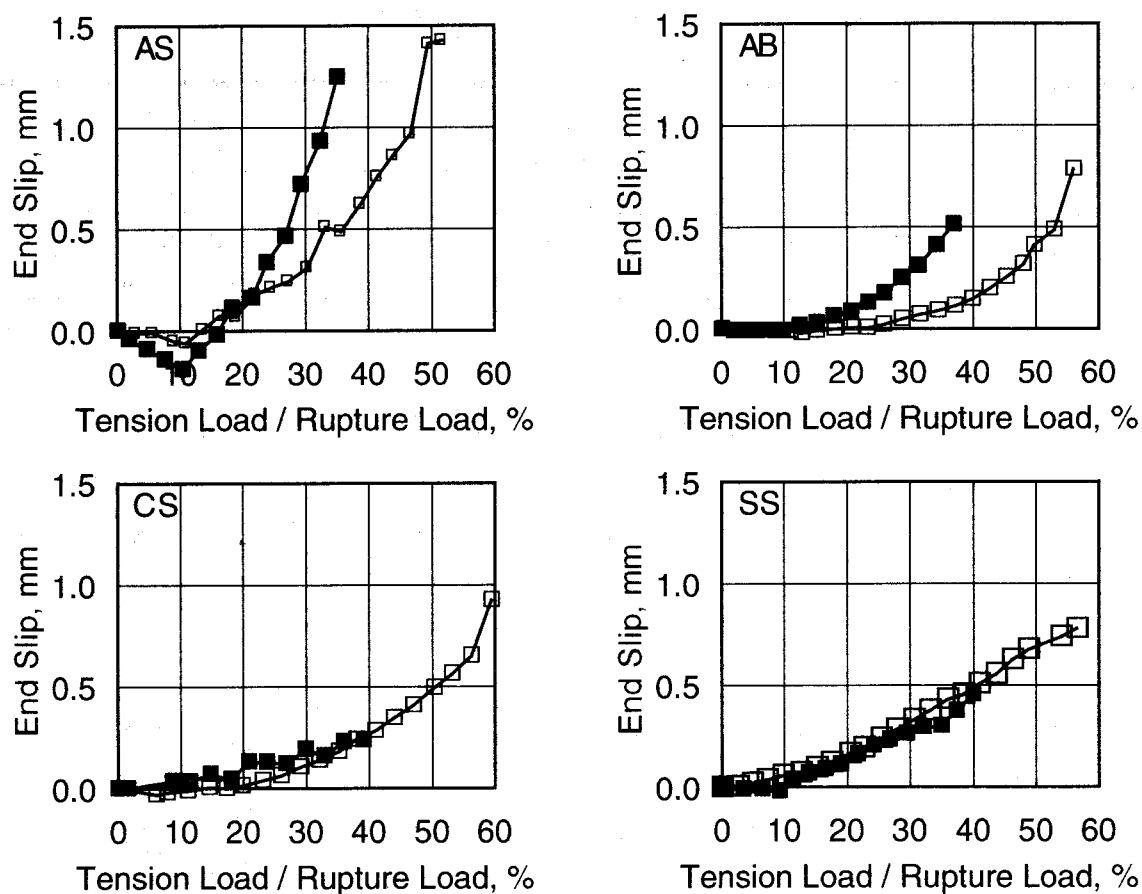


Fig. 6.11 End Slip (■: 40%, □: 60%)

$$\frac{P_t(S_0 + l)}{EA} + S_0 = d \quad S_0 = \frac{d - \frac{P_t l}{EA}}{\frac{P_t}{EA} + 1} \quad \text{Eq. 6.1}$$

ここに、 P_t : 導入力(kN)
 S_0 : 部材端変位(mm)
 l : 部材端からダイヤルゲージ位置までの距離(mm)
 E, A : 緊張材の弾性係数(kN/mm²), 断面積(mm²)
 d : ダイヤルゲージの値(mm)

炭素より線およびPC鋼より線で初期緊張力ごとの部材端変位の差がほとんどないのに対し、アラミドより線およびアラミド組紐では、60%の場合に部材端変位が小さくなっており、伝

達長と同様、弾性係数が小さいためと考えられる。また、緊張材間で比較すると、弾性係数の小さいアラミドより線の部材端変位が大きくなっている。

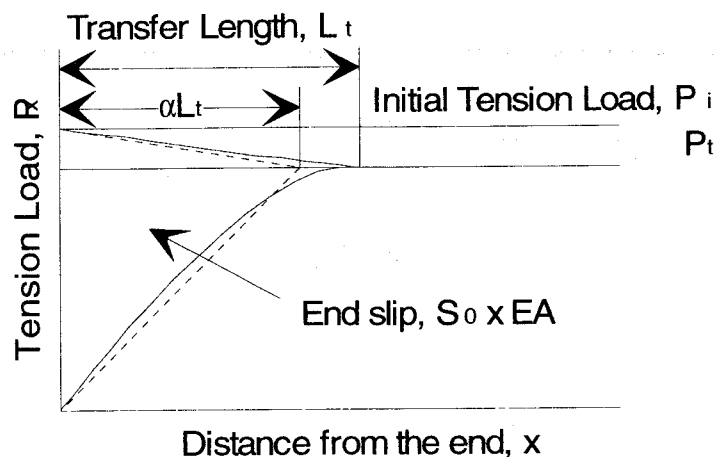


Fig. 6.12 End Slip and Transfer Length

c) 部材端変位による伝達長の推定

導入直後の部材端変位は、Fig. 6.12に示す網掛け部分の面積を緊張材の弾性係数と断面積の積 $E_f A_f$ で除したものとなることから、伝達長 L_t は次式で与えられる¹⁾。

$$L_t = \frac{2E_f \cdot A_f}{\alpha P_i} S_0 \quad \text{Eq. 6.2}$$

| | |
|------------|------------------|
| ここに、 L_t | : 伝達長 |
| E_f, A_f | : 緊張材の弾性係数および断面積 |
| P_i | : 初期緊張力 |
| S_0 | : 導入端変位 |
| α | : 補正係数 |

ただし、補正係数 α は導入完了付近で緊張材軸力分布 P_x が曲線状となるのを折線と仮定したために生ずる誤差を補正するための係数である。Eq. 6.2 に対し、補正係数を以下のようにして求めた。

まず、導入力と伝達長(Fig. 6.9)を原点を通る1次関数、導入力と導入端変位(Fig. 6.11)を原点を頂点とする2次関数で近似した。Eq. 6.1の初期緊張力に導入中の各導入力を、また導入力で表した伝達長および導入端変位を代入して補正係数 α を求めた。この場合、 α は定数となり、Table 6.7に示す値となる。同一緊張材では初期緊張力による α の差はほとんどなく、 α

は緊張材固有の値であるものと考えられる。

Table 6.7 Adjustment Coefficient α

| Tendon | 40% | 60% |
|--------|-------|-------|
| AS | 0.469 | 0.444 |
| AB | 0.564 | — * |
| CS | 0.808 | 0.822 |
| SS | 0.578 | 0.584 |

* No data.

d) τ -S 関係

アラミドより線 60%の τ -S 関係を、比較的すべりの大きい部材端から 40, 90, 140, 190mm の各位置についてFig. 6.13に示す。 τ -S 関係は、各位置における、導入中の付着応力とすべりを結んで得たものである。付着応力は、Eq. 2.4 における ε_x に、最寄の3点を結ぶ2次曲線を連結したひずみ分布を代入することにより求めた。また、すべりは、緊張材中央部をすべりが0として、上記のひずみ分布を各位置まで積分することにより求めた。

部材端付近の40mmを除けば各位置の τ -S 関係はほぼ等しく、この傾向は他の緊張材についても同じであった。部材端付近では応力の乱れが生じていたものと考えられる。各緊張材の部材端から90mmの位置の τ -S 関係をFig. 6.14に示す。アラミドより線では最大付着応力はPC鋼より線よりわずかに大きい、最大付着応力に達するまでの上昇域の傾き(付着剛性)は炭素より線およびPC鋼より線より小さくなっており、大きなすべりを伴って付着応力が上昇している。これに対して、伝達長がPC鋼より線より短いのは、伝達長に与える弾性係数および最大付着応力の影響が大きいためと考えられる。

3.2 導入後の定着性状

a) 伝達長の経時変化

導入後の緊張材ひずみ分布の経時変化を、炭素より線 60%についてFig. 6.15に示す。導入後1日で、導入中にひずみの増加が見られた区間で増加が見られ、それ以後は全区間でほとんど増加が見られない。導入時にひずみの増加が見られなかった区間では増加していないため、伝達長はほとんど変化していないといえる。この傾向は他の緊張材についても同様であった。

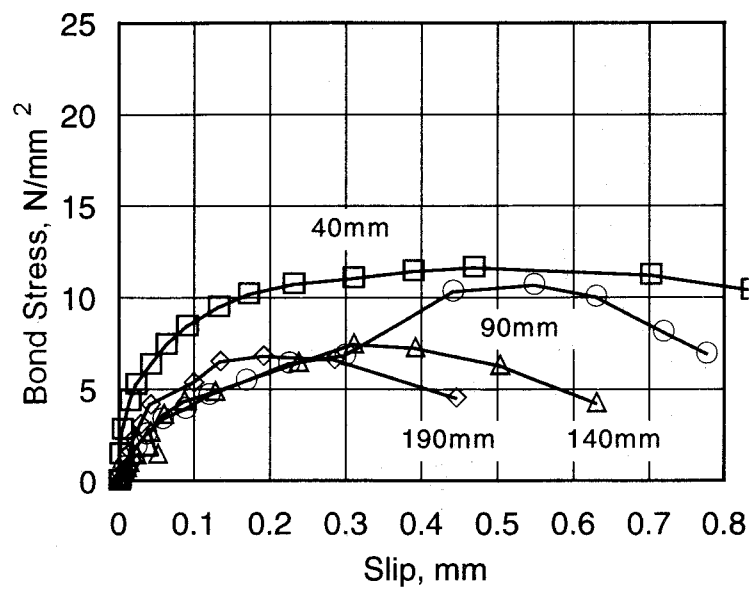


Fig. 6.13 τ -S Relationship (AS60%)

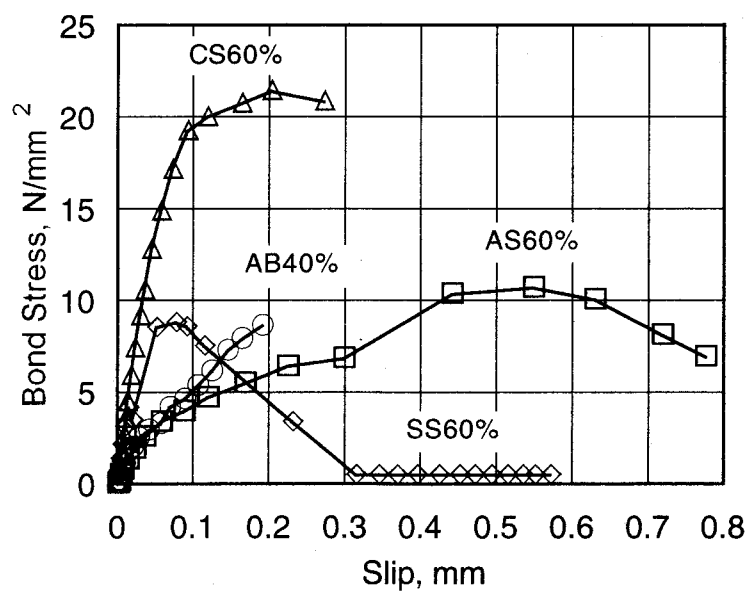


Fig. 6.14 τ -S Relationship (90mm from the End)

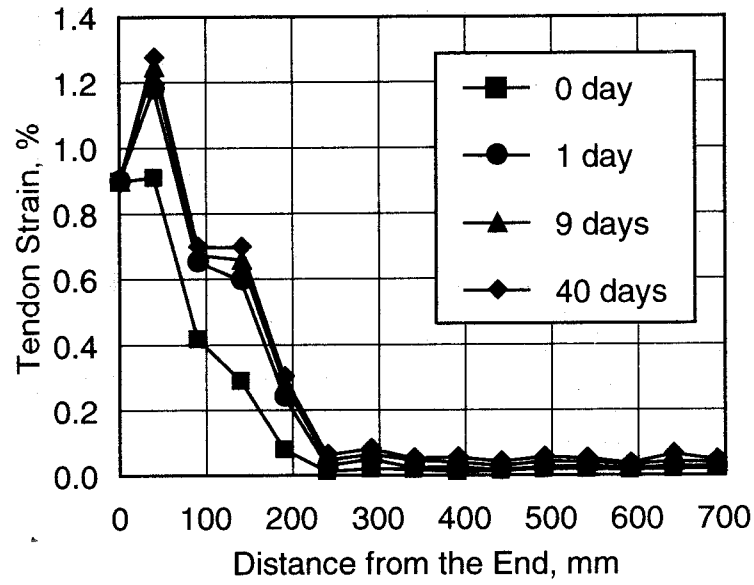


Fig. 6.15 Tendon Strain (CS60%)

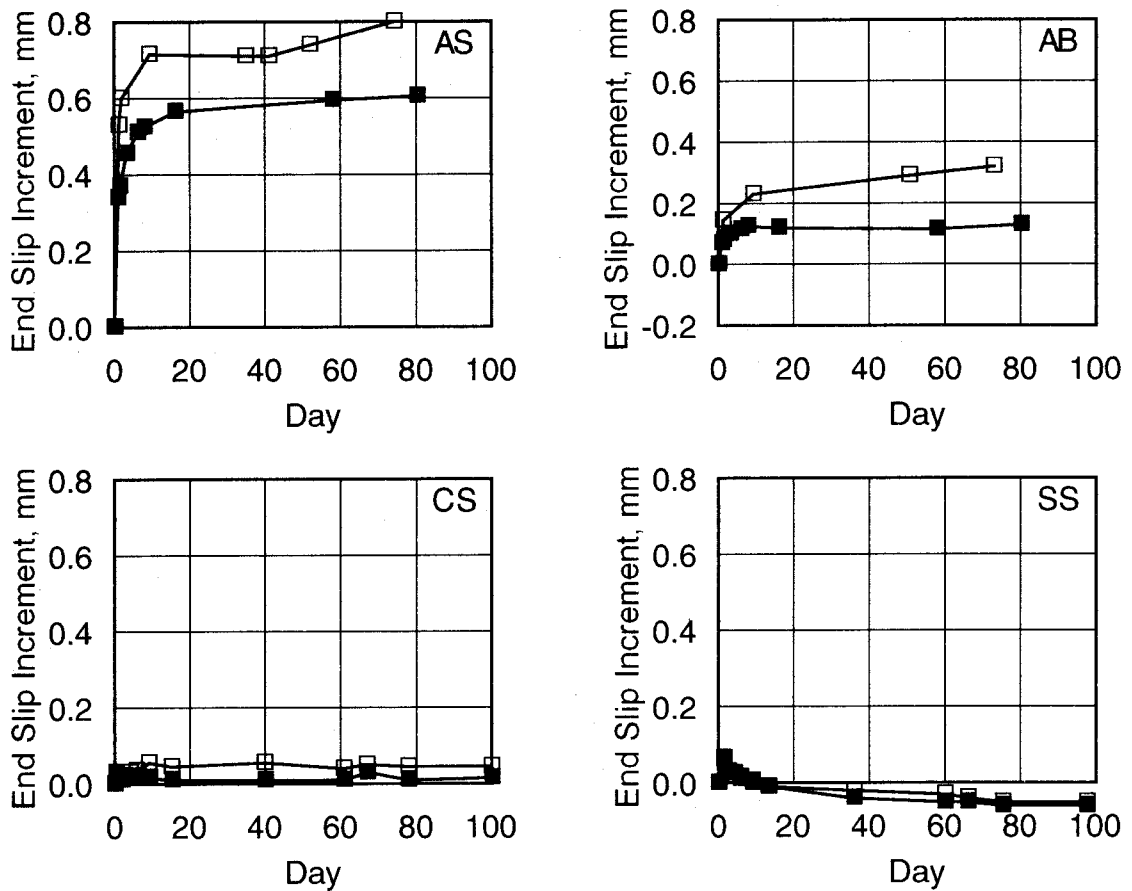


Fig. 6.16 End Slip Increment (■: 40%, □: 60%)

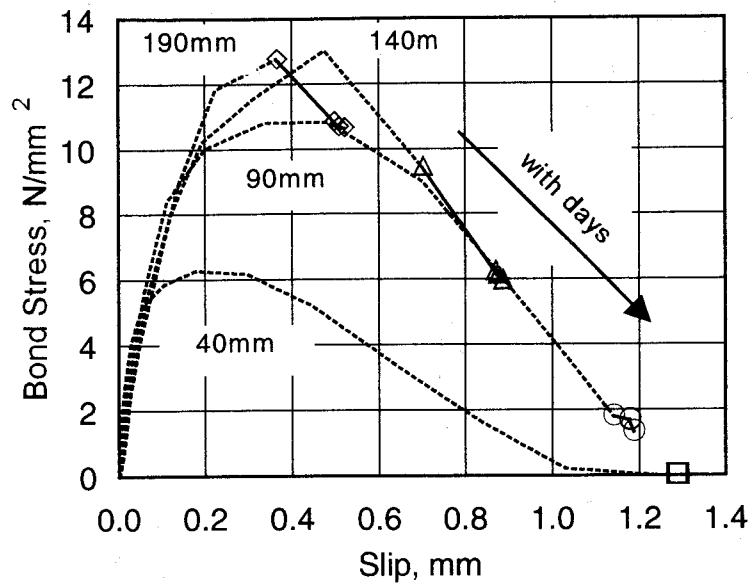


Fig. 6.17 Changes in τ -S Relationship (AS40%)
 (□: 40mm, ○: 90mm, △: 140mm, ◇: 190mm)

b) 部材端変位増分の経時変化

導入後の部材端変位増分の経時変化を、棒材についてFig. 6.16に示す。アラミドより線およびアラミド組紐は導入後短期間に増加が生じているが、約 10 日で微増あるいは収束した。炭素より線および PC 鋼より線は増加はわずかで、それ以後も収束あるいは減少している。部材端変位が減少するのはコンクリートの乾燥収縮の影響と考えられる。アラミドより線のように、部材端変位の大きいものでもプレテンション用緊張材として用いる場合は、長期性状は安定している。

c) τ -S 関係の経時変化

アラミドより線 40%について、導入直後から 16 日間にわたっての τ -S 関係の経時変化を、Fig. 6.17のように表現した。 τ -S 関係は、比較的すべりが大きく現れた、導入端から 40, 90, 140, 190mm の位置について表示した。Fig. 6.17中の点線は、導入時に得られたそれぞれの位置での τ -S 関係を表しており、その後の同じ位置での(τ , S)の測定値を、点線に続けて実線で示したものである。

先述のとおり、導入端付近(40mm)を除けば、導入時に得られた各位置の τ -S 関係は、ほぼ等しくなっている。導入後は、それぞれの位置における(τ , S)は、 τ が小さくなるとともに S が大きくなっており、すなわち、Fig. 6.17に示すように右下がりの軌跡を描いている。しかし、いずれの位置においても、その軌跡は、導入時の τ -S 関係に従ったものになっていることが分かる。これは、この期間内では、導入後も τ -S 関係に顕著な違いは現れてないことを

示していると考えられる。この傾向は他の緊張材についても同様であった。また、すべりが大きかった 40 および 90mm では、すべりによってすでに付着応力が大きく低下しほとんど発生していない状態であるため、経時的なすべりの増加はほとんど見られない。それ以外の位置でも導入後 1 日で顕著なすべりが認められるものの、それ以後はほぼ増加が見られない。これは、部材端変位の経時変化の傾向と同じ傾向である。

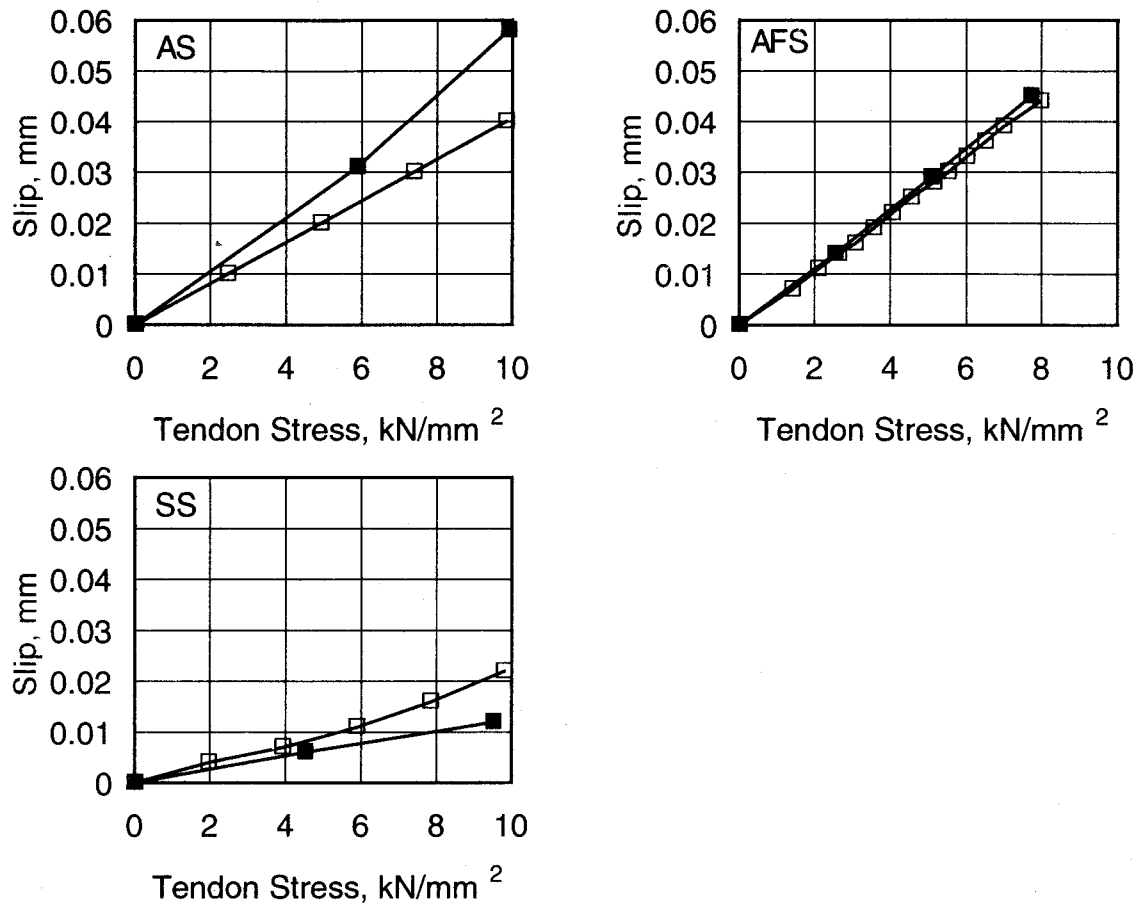


Fig. 6.18 Relationship between Slip and Tendon Force (□: Slip Out ■: End Slip)

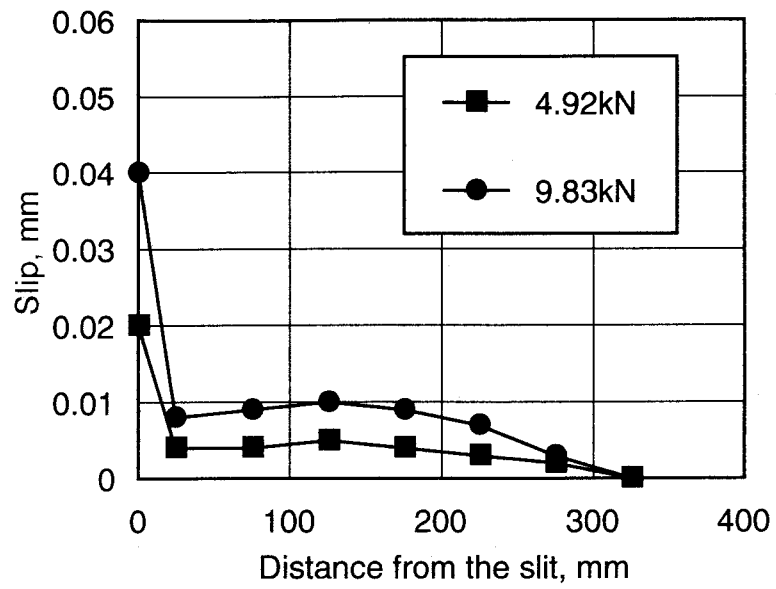


Fig. 6.19 Slip Distribution (Aramid Strand, Flexural Test)

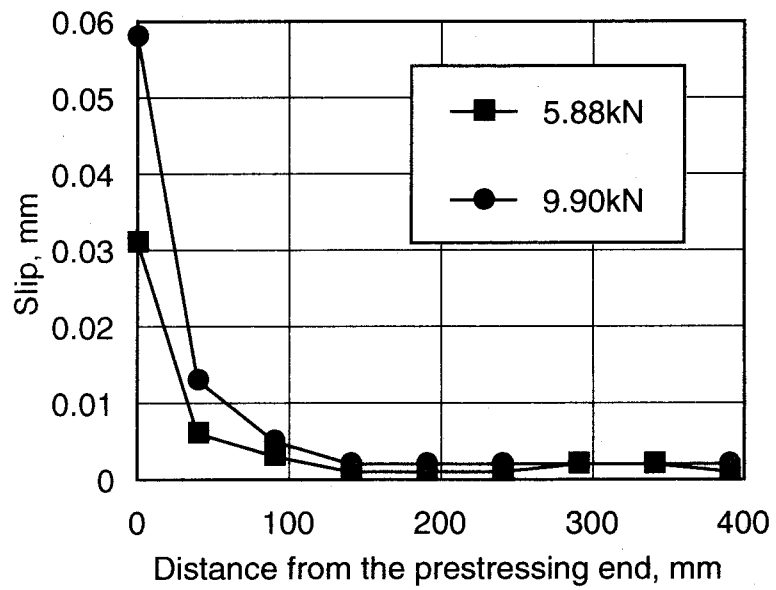


Fig. 6.20 Slip Distribution (Aramid Strand, Transfer Test)

4. 曲げ試験

4.1 曲げ載荷時のひび割れ面からの拔出し性状

a) 拔出し変位

切欠き以外にひび割れが発生する前の比較的小さい曲げ荷重載荷時の緊張材ひずみから求めた切欠きでのすべりを緊張材軸力増分との関係で表したものを、定着試験の緊張材ひずみから求めた部材端変位とともにFig. 6.18に示す。各緊張材のすべりは定着時、曲げ載荷時ともに軸力増減に比例している。また、両試験間で多少のばらつきはあるものの、同じ軸力増減でのそれぞれのすべりはほぼ等しくなっている。アラミドより線およびアラミドシートのすべりはほぼ等しく、PC 鋼より線より大きい。切欠き以外でひび割れが発生した後である、所定の曲げ荷重載荷直後では、PC 鋼より線で最も多いひび割れ本数および最も大きいひび割れ幅となった。

b) すべり分布

緊張材ひずみから求めた切欠き以外にひび割れが発生する前の比較的小さい曲げ荷重載荷時のすべり分布を、アラミドより線の片側のスパンについてFig. 6.19に、また、比較のため、定着試験の際の各導入力時におけるアラミドより線のすべり分布をFig. 6.20に示す。ただし、曲げ試験は計算による緊張材軸力増分、定着試験は導入力である。定着試験の導入端付近でのすべりと同様、切欠き付近で大きなすべりが生じているが、すべりが生じている区間は曲げ試験が長い。他の緊張材でも曲げ載荷時のすべりが生じている区間は定着試験時の区間より長く、定着試験時より最大付着応力が小さく、付着応力が内部に伝達されていることを表している。

4.2 曲げ載荷後のひび割れ面からの拔出し性状

a) ひび割れ幅増分の経時変化

載荷後のひび割れ幅増分の経時変化をFig. 6.21に示す。曲げ荷重の小さいアラミドシート10%を除けば、載荷後1日でひび割れ幅が大きく増加し、PC 鋼より線でその増加量はアラミドより線およびアラミドシートより大きい。その後は、アラミドより線でわずかに増加傾向にあるのに対し、アラミドシートは載荷後15日を過ぎると一定値に漸近し、PC 鋼より線は載荷後5日を過ぎると減少する傾向にある。このように、アラミドより線でPC 鋼より線よりひび割れ面での時間的なすべりは大きく、アラミドより線ではさらに長期的な挙動を把握する必要がある。また、アラミドより線およびアラミドシートで緊張材軸力増分の大きい20%が10%よりひび割れ幅増分が著しく大きい。

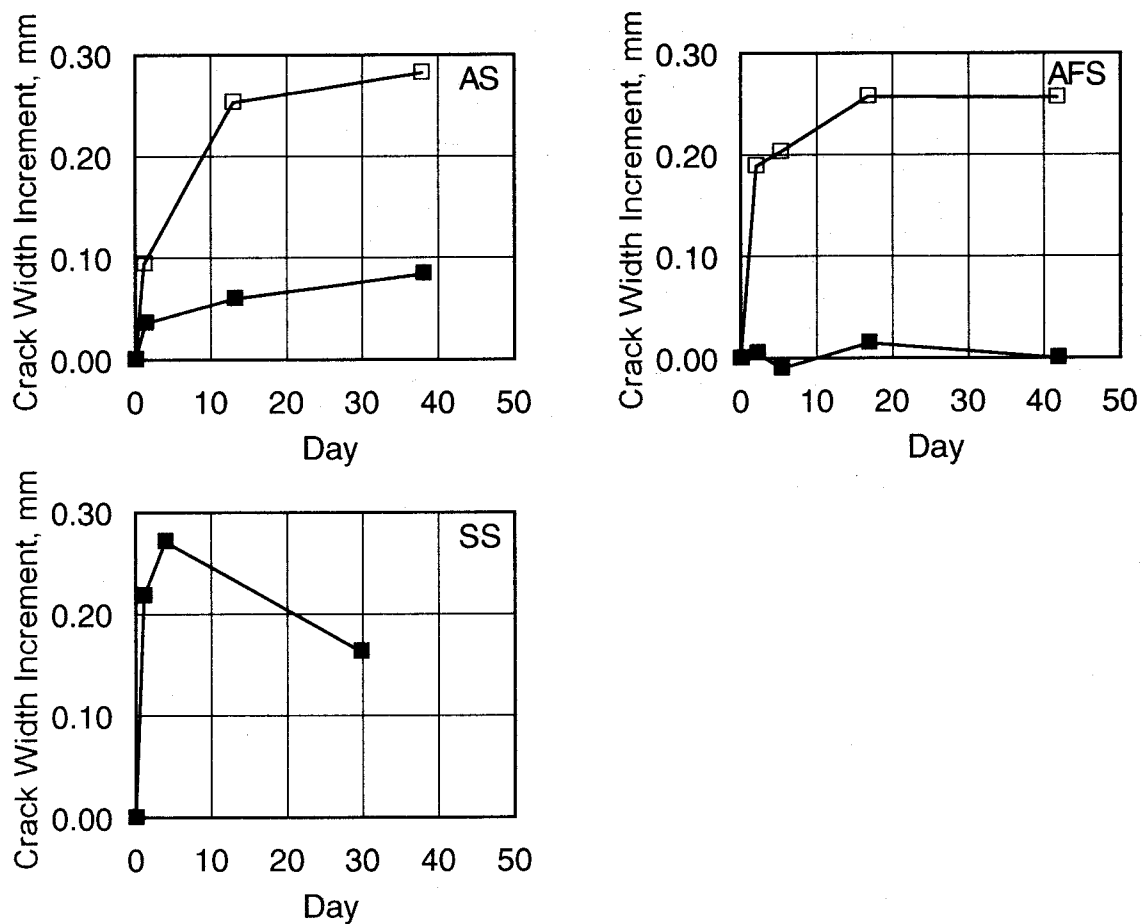


Fig. 6.21 Changes in Crack Width Increment (■: 10%, □: 20%)

b) 拔出し変位の経時変化

アラミドシートで、载荷直後のひび割れ面からの拔出しおよび導入直後の部材端変位を Table 6.8 に、それらの载荷後の増分の経時変化を Fig. 6.22 に示す。ただし、ひび割れ面からの拔出しはひび割れ幅の 1/2 とした。等しいシートの軸力増減で、载荷直後あるいは導入直後の各すべりおよびこれらの経時変化はほぼ等しく、アラミドシートでは定着性状と曲げ载荷での付着性状およびこれらの長期性状はほぼ等しいものと考えられる。

Table 6.8 Slip out from Crack Section and End Slip (Aramid Sheet)

| Name | Slip out (mm) | End Slip (mm) |
|--------|---------------|---------------|
| AFS10% | 0.009 | 0.005 |
| AFS20% | 0.061 | 0.075 |

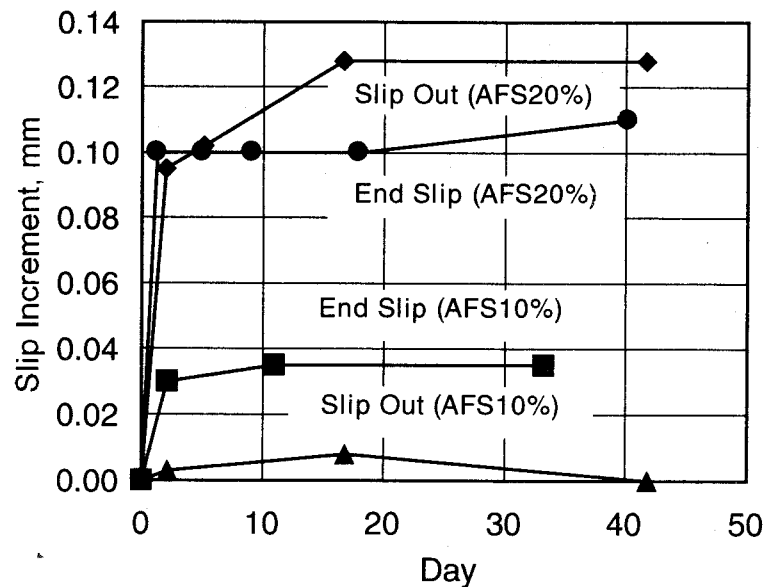


Fig. 6.22 Changes in Slip out Increment from Crack Section and End Slip Increment (Aramid Sheet)

5. 本章のまとめ

連続繊維緊張材としてアラミドより線、炭素より線、およびアラミドシートを対象とし、プレストレス導入中のコンクリートとの定着性状および導入後のその長期性状について検討し、 τ - S 関係として取りまとめるとともに、漸増曲げ荷重下におけるひび割れ面からの拔出性状および持続曲げ荷重下におけるその長期性状について検討を行った。

本研究から得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) アラミドより線、アラミド組紐および炭素より線の伝達長は PC 鋼より線より短い、部材端変位が大きくなる。伝達長に与えるヤング係数および最大付着応力の影響が大きいと考えられる。また、アラミドシートでは導入直後にコンクリートの付着したシートがめくれ上がる状態で剥離したものがあつた。アラミドシートの厚みにより面外方向に剥離(Peel)荷重が作用し、脆弱なモードで破壊したためと考えられる。
- (2) 導入後の部材端変位増分は、比較的大きいアラミドより線でも載荷後約 10 日で微増あるいは一定値に漸近し、プレテンション用緊張材として用いる場合は、長期性状は比較的安定しているものと考えられる。
- (3) 比較的すべりが大きく現れたいくつかの位置での(τ , S)の経時変化を、導入直後から16日

間にわたってプロットした結果、導入後のそれぞれの位置における(τ , S)は、 τ が最大値を迎えていたため τ が小さくなるとともに S が大きくなっており、右下がりの軌跡を描いていた。しかし、いずれの位置においても、その軌跡は、導入時の τ - S 関係に従ったものになっており、この期間内では、 τ - S 関係に顕著な違いは現れていなかった。

- (4) 導入時と曲げ載荷時で、緊張材軸力の増減が同じ段階でのすべりを比較すると、端部ではほぼ等しいすべりとなっているものの、すべりが生じている区間は曲げ載荷時が長く、導入時より最大付着応力が大きくなならないうちに、付着応力が内部に伝達されていた。
- (5) 曲げ載荷後のひび割れ幅はアラミドより線で測定期間中は増加しており、導入後の部材端変位増分の経時変化と異なる。また、アラミドシートでは、等しいシートの軸力増減で、載荷直後あるいは導入直後の各すべりおよびこれらの経時変化はほぼ等しく、アラミドシートでは定着性状と曲げ載荷での付着性状およびこれらの長期的性状はほぼ等しいものと考えられる。

参考文献

- 1) 藤井 學: プレストレストコンクリート部材の定着部補強に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1971.8.
- 2) 小林 和夫, 藤井 學, 渡辺 明: プレストレストコンクリートの力学, 新体系土木工学 34, pp.83-97, 技報堂出版.
- 3) 藤井 栄: 鉄筋コンクリートにおける付着・定着機構とその部材性能に及ぼす影響に関する研究, 京都大学博士論文, 1992.1.
- 4) 是永 健好, 渡辺 秀義, 小林 淳: PC 鋼より線の付着実験, 大成建設技術研究所報, 第 27 号, pp.111-116, 1994.
- 5) 渡辺 明: ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 125 号, pp.21-35, 1966.1.
- 6) 藤井 學, 荒木 毅: プレテンション用 PC 鋼材の付着性能の評価法について, セメント技術年報, XXVI, 97, pp.509-512, 1972.
- 7) RILEM-FIP-CEB Committee: Prescription for the testing of the determination of the adhesive quality of the prestressing reinforcement, RILEM, mai-juin, No.15, 1970.
- 8) 坂 静雄, 六車 熙, 森田 司郎: ストランドの定着時の付着効果に関する実験的研究, 材料試験, 第 8 巻, 第 69 号, pp.15-24, 1959.6.
- 9) Base, G.D.: Some Tests on the Effect of Time on Transmission Length in Pre-tensioned concrete, Magazine of Concrete Research, 1957.8.
- 10) 金 普漢, 大野 義照, 鈴木 計夫, 若松 達史: プレテンション用緊張材として用いた異形鉄筋の定着長さ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.985-990, 1994.
- 11) Kaar, P.H., Lafraugh and M.A.Mass: Influence of concrete strength on strand transmission length, Jour.of PCI, Vol.8, No.5, 1963.10.
- 12) 岡田 清, 藤井 學, 小沢 恒雄: PC ストランドの定着長に関する研究, セメント技術年報, XVII, 86, pp.527-530, 1963.
- 13) Ratz, E. H., M. M. Holmjansky and V. M. Kolner: The transmission of prestress to concrete by bond, Proc. of 3rd Congress of FIP, Berlin, 1958.
- 14) 長滝 重義, 佐藤 良一, 鯉淵 芳伸: 異形鉄筋とコンクリートとの付着クリープ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.6, pp.553-556, 1984.

- 15) 鈴木 計夫, 大野 義照, 栗田 佳彦, 横田 聡: 持続荷重下におけるプレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.7, pp.481-484, 1985.
- 16) A. M. Neville, W. H. Dilger and J. J. Brooks: Creep of Plain & Structural Concrete, Longman Group Limited, 1983.
- 17) (財)鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱耐震補強工法設計・施工指針, 1996.7.
- 18) (財)鉄道総合技術研究所: アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱耐震補強工法設計・施工指針, 1996.11.
- 19) 堀口 敬, 佐伯 昇: コンクリートの強度が繊維シートの付着特性に与える影響, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.71-74, 日本コンクリート工学会北海道支部, 1996.11.
- 20) 浅野 靖幸, 佐藤 靖彦, 上田 多門, 小野 定: 炭素繊維シートの付着特性について, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.75-80, 1996.11.
- 21) 篠崎 裕生, 三上 浩, 加島 清一郎, 樋口 昇: アラミド繊維シートを貼り付けて補強した RC 梁の曲げ耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1563-1568, 1997.
- 22) 岳尾 弘洋, 松下 博通, 牧角 龍憲, 長島 玄太郎: CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.
- 23) 甄 曉青, 佐伯 昇, 志村 和紀, 秦 滋康: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 桁の耐力, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp.934-935, 1996.9.
- 24) 出雲 健司, 甄 曉青, 志村 和紀, 佐伯 昇: アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 部材の曲げ・せん断補強効果, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, pp.141-146, 1996.11.
- 25) 出雲 健司, 浅水 俊博, 佐伯 昇, 志村 和紀: テンションシートを用いた PRC 部材のせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1557-1562, 1997.

第7章 過酷環境下における連続繊維シートによる コンクリート構造物の補修・補強

1. 本章の目的

近年、連続繊維シートをコンクリート表面に樹脂で含浸、接着して FRP 層を形成し、補修・補強を行う試みがなされている。この工法は、特に阪神・淡路大震災以降、その施工性の良さや材料自身の高い耐久性への期待などから橋脚をはじめ広く適用されている¹⁾。

一方、代表的な苛酷環境にある下水道施設では、細菌の生物学的作用による硫酸の生成によりコンクリートが腐食することが広く知られており²⁾、地中に埋設された下水管では、腐食に伴う強度低下や上載荷重によるひび割れの発生、漏水あるいは崩壊が問題となっている。これに対し、使用材料の耐久性、施工断面および表面粗度等の制約からコンクリート表面に樹脂ライニングを適用する防食被覆工法がよく用いられる³⁾が、劣化因子の侵入を防止する意味合いが強く、既設劣化構造物の補強効果をも兼ね備えた有効な工法が望まれている。これに対し、連続繊維シート貼付け工法の適用が考えられる。

下水道施設という過酷環境下におかれたコンクリート構造物へ適用し、長期にわたる供用性を確保するためには、力学的性質のみでなく、酸性雰囲気における耐久性が重要である。複合材料である FRP 層の強度を支配するのは一般には繊維であるが、構成材料ごとの、またコンクリートも含めた複合材料としての耐酸性を明らかにする必要がある。

本章では、下水道施設への連続繊維シート貼付け工法の適用を目的として、FRP 層を形成する種々の連続繊維シート、樹脂およびそれらを組合わせた FRP 板の耐酸性を調査するとともに、コンクリート供試体へ適用して曲げ補強効果とその耐酸性を検討した。さらに、下水道施設として健全および管内面ひび割れ発生後の遠心力鉄筋コンクリート管(以下、ヒューム管)を取り上げ、内外面に適用した種々の仕様の FRP 層による外圧に対する補強効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 連続繊維シートおよび樹脂材料

連続繊維シートおよび樹脂の基本特性の代表値をそれぞれ Table 7.1, Table 7.2 に示す。連

続繊維シートには、主として高強度(HS)タイプの炭素繊維からなるもの(CS)およびアラミド繊維からなるもの(AS)を用いた。これらは単位幅当たりではほぼ同じ繊維断面積を有している。また、CS の目付量を 2/3 に減らしたもの(C2)、高弾性(HM)タイプの炭素繊維からなるもの(CM)およびガラスクロス(GC)も用いた。CS、C2 および CM では細いガラス繊維を、AS ではポリエステル繊維を横方向に使用しており、織物の構造により縦方向繊維に大きな強度低下がないようにしてある。なお、いずれも幅 200mm のものを用いた。

Table 7.1 Typical Properties of Fiber Sheets

| Name | CS | AS | C2 | CM | GC |
|--|----------------|--------|-------------|-------------|-------|
| Type | Carbon (HS) | Aramid | Carbon (HS) | Carbon (HM) | Glass |
| Specific Gravity* | 1.80 | 1.39 | 1.80 | 1.84 | 2.54 |
| Tensile Strength* (kN/mm ²) | 4.90 | 3.43 | 4.90 | 4.20 | 1.47 |
| Young's Modulus* (kN/mm ²) | 230 | 72.5 | 230 | 436 | 72.5 |
| Elongation* (%) | 2.1 | 4.6 | 2.1 | 1.0 | 2.0 |
| Plain Weave | Unidirectional | | | | Cross |
| Weave Density (g/m ²) | 300 | 233 | 200 | 300 | 203** |
| Fiber Cross Section (mm ² /m) | 167 | 168 | 111 | 163 | 40.0 |

*Data of fiber strand. **1/2 in longitudinal direction.

Table 7.2 Typical Properties of Resins

| Name | NR | AR | FR | GR* | CR** |
|--|------------------------------------|-------|-------|------|------|
| Epoxy Resin | Bisphenol with reactive diluent*** | | | | |
| Hardening Agent | Modified aliphatic polyamine | | | | |
| Specific Gravity | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1.8 |
| Tensile Strength (N/mm ²) | 42.7 | 25.0 | 20.6 | 16.7 | 11.8 |
| Young's Modulus (kN/mm ²) | 1.57 | 0.794 | 0.706 | — | — |
| Flexural Strength (N/mm ²) | 76.5 | 35.3 | 22.5 | 29.4 | 25.5 |
| Elongation (%) | 3.0 | 8.0 | 20 | — | — |

*For the glass cloth. **For the resin mortar. *** NR/AR/FR/GR: with inorganic filler, GR: with pigment

樹脂はいずれも常温硬化型エポキシ樹脂であり、主として連続繊維シートへの含浸性を考慮した標準的なもの(NR)、含浸性に加えて架橋構成の調整により耐酸性を高めたもの(AR)、および後者と引張強度が同程度であるが架橋密度を低くして伸びを高めた耐酸性を考慮していないもの(FR)の3種類を用いた。なお、GCには別の樹脂(GR)を用い、また耐酸性の比較のためセラミックパウダーを混入して樹脂モルタルとして用いる別の樹脂(CR)も用いた。なお、GCおよびCRの仕様は、コンクリート防食指針(案)⁴⁾に示されている防食被覆ライニングの標準仕様のうちそれぞれC-1およびC-3種に適合する市販材料の組合せであり、補強を目的としたものではない。

2.2 連続繊維シート、樹脂およびFRP板の耐酸性

連続繊維シート、樹脂およびそれらを組合せて作成したFRP板の耐酸性を、主として酸浸漬による引張特性の経時変化により評価した。試験要因および試験条件をTable 7.3に示す。なお、FRP板試験片の名称は(連続繊維シート)-(樹脂)としている。これらの試験は、それぞれJIS K 7601「炭素繊維試験方法」、JIS K 7113「プラスチックの引張試験方法」およびJIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準拠して行った。

Table 7.3 Test Programs for Fiber Sheet, Resin and FRP Plate

| | | Fiber Sheet | Resin | FRP Plate* |
|---------------|-------------------|---|-----------------|------------------------------------|
| Name | | CS | NR AR FR | CS-NR CS-AR CS-FR** AS-AR |
| Test Standard | | JIS R7601 | JIS K 7113 | JIS K 7073 |
| Resin Curing | | 1 day in room and drying 2 hours at 80°C | 2 weeks at 23°C | 2 weeks at 20°C |
| Loading | Rate (mm/min) | 20 | 2 | 1 |
| | Temperature (°C) | Room temperature | 23 | Room temperature |
| Measurement | Gauge length (mm) | 200 | 50 | 100 |
| | Tensile strength | ○ | ○ | ○ |
| | Strain | ○ (Elongation meter) | ○ (Divider) | ○ (20mm Strain gauge***) |
| | Young's Modulus | ○ | ○ | ○ |
| | Elongation | — | ○ | ○ |
| | Weight | — | ○ | — |

○: Done *Fiber Sheet-Resin. **Not immersed. ***Elongation meter was used for 6 months specimen.

a) 試験片とその作成

連続繊維シート試験片は、12,000 フィラメントの繊維を手作業でほぐし出し常温硬化型ビニルエステル樹脂を含浸、硬化させた樹脂含浸ストランド(幅約 4mm)とした。樹脂試験片は、比較的伸びの小さい材料に用いる 1 号形試験片(厚さ 7mm)とした。FRP 板試験片は、連続繊維シートのコンクリートへの適用を想定し、ハンドレイアップ法で作成した。連続繊維シートを平行に 2 層使用し、繊維体積比 V_f が約 30% となるように樹脂を均一に塗布して含浸させた後、常温で硬化させ FRP 板とした。所定の浸漬期間経過後、ガラス繊維強化プラスチック製のタブを接着し、連続繊維に平行な所定の幅に切断して I 形試験片(厚さは CS を用いたもので約 1.1~1.2mm, AS で約 1.4~1.5mm)とした。いずれの試験も各要因につき 5 体の試験片を作成した。樹脂および FRP 板試験片の形状・寸法を Fig. 7.1 に示す。

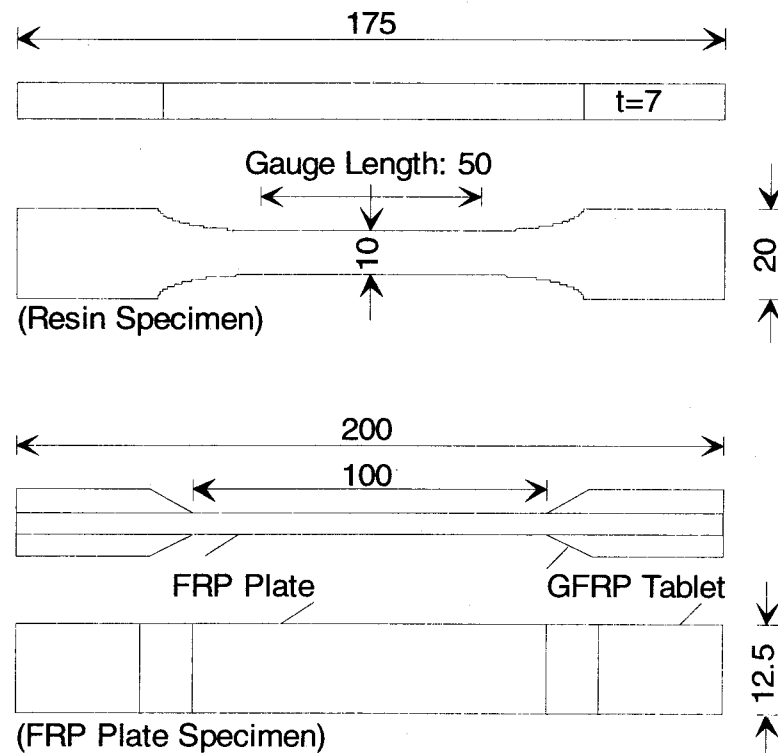


Fig. 7.1 Resin and FRP Plate Specimens (Unit: mm)

b) 試験方法および測定項目

i) 硫酸への浸漬

下水道施設への適用を考慮し、耐酸性を検討するために促進環境として使用した溶液は、コンクリート防食指針(案)を参考に、10%の硫酸水溶液とした。各材料を室温(樹脂は 23°C)にて 1, 2, 3 または 6 ヶ月間浸漬(CS-FR を除く)し、引き上げた後十分に水洗して表層の硫酸を除去してから試験時まで気中乾燥した。これらのうち 2 ヶ月は、上記指針(案)に示されて

いる防食被覆材の標準仕様のうち最も厳しい腐食環境に適用するためのD種に対し、ふくれ、割れ、軟化、溶出がないことを確認する浸漬期間に相当する。なお、連続繊維シートは、繊維配向乱れを極力減らすため織物状態のまま浸漬した。また、樹脂試験片については引き上げ後に質量を測定した。

ii) 引張試験

所定の荷重速度で破断までの引張試験を行い、荷重およびひずみを測定した。なお、FRP板試験片の引張応力は本来全断面積で除した値とすべきであるが、ハンドレイアップ成形のため厚さのばらつきが大きく、浸漬による影響の精確な検討が困難となるため、繊維の断面積で除して求めた。ヤング率は、連続繊維シートでは破断時ひずみの30～70%、FRP板では10～60%間の割線勾配から求め、樹脂ではチャック間の値を用いて載荷初期の直線部(荷重で0.3～0.6kN程度)で求めた。

2.3 コンクリートの曲げ補強効果とその耐酸性

次に、種々の仕様のFRP層の補強効果をコンクリートの曲げ試験により検討するとともに、その耐酸性を、主として酸浸漬による曲げ特性の経時変化により評価した。試験要因をTable 7.4に示す。

Table 7.4 Test Program for Concrete

| Fiber Sheet | Resin | Fiber Layer | Immersion Period (Month) | Number |
|-------------|------------|---------------|-----------------------------|--------|
| CS | NR, AR, FR | 1 ply | 0, 1, 2, 6 | 3+2+1* |
| AS | NR | 0° 2 plies | 0 | 3 |
| | | 90° 2 plies | | |
| GC | GR | 1 ply | 0, 1, 2, 6 | 2+2* |
| — | CR** | Thickness=3mm | | |

*+2 for each immersion period, +1 for the pull-off bond test. **Resin mortar.

a) 供試体とその作成

供試体には、100×100×400mmの無筋コンクリートの下縁中央に、曲げひび割れ位置を特定するためノッチを設け、支点外側を含む下縁全面にFRP層を適用したものをを用いた。FRP層には主としてCSまたはASのそれぞれにNR, ARまたはFRの3種類を組合せたものをを用い、軸方向1, 2層あるいは直交2層で貼付けた。さらに、1層のGCおよび厚さ3mmのCRも用いた。各要因につき3ないし2体の供試体を作成し、また各浸漬期間経過後の載荷時に2体の無補強で非浸漬の供試体を作成して基準とした。供試体の形状寸法をFig. 7.2

に示す。

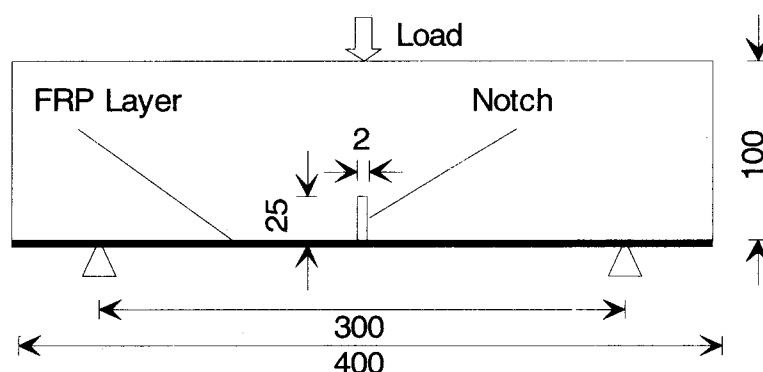


Fig. 7.2 Concrete Specimen (Unit: mm)

コンクリートの示方配合および載荷時の強度試験結果をそれぞれTable 7.5, Table 7.6に示す。また、各FRP層の施工手順および設計値をTable 7.7に示す。FRP層は2週間以上室内で養生した。

b) 試験方法および測定項目

i) 硫酸への浸漬

FRP層適用面を、連続繊維シート等と同様に、10%の硫酸水溶液に室温(5~10℃)にて所定の期間浸漬した。供試体側面(喫水約25mm)および上面には、コンクリート保護のため厚さ約1mmのエポキシ樹脂ライニングを施し腐食を防いだが、曲げ試験時には削り取った。供試体は引き上げた後十分に水洗して表層の硫酸を除去してから試験時まで気中乾燥した。

ii) 曲げ試験

Fig. 7.2に示すように、載荷スパン300mmで中央一点載荷の曲げ試験を室温で行った。荷重制御により静的漸増載荷を行い、ノッチ先端のひび割れ発生時に一旦除荷し、再載荷して耐力を失うかFRP層の剥離が支点付近に到達した時点で除荷し載荷を終了した。載荷中の測定項目は以下の通りである。

荷重、スパン中央たわみ：ロードセル(容量100kN)を用いて載荷荷重を測定するとともに、支点沈下をキャンセルするための治具を用い、スパン中央のたわみを変位計(容量10mm)により測定した。

中央断面のひずみおよびFRP層表面ひずみ：スパン中央の上縁から10mmの位置にひずみゲージ(検長30mm)を、また75(ノッチ先端)および90mmの位置にπ型ひび割れゲージ(検長50mm, 容量2mm)を取り付けるとともに、FRP層表面のスパン中央から支点に向かって0, 25, 50および100mmの4か所にひずみゲージ(検長5mm)を貼付け、中央ひび割れ断面およびFRP層表面ひずみを測定した。

Table 7.5 Mix Proportion of Concrete

| Target Strength f_{cr} (N/mm ²) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit Mass (kg/m ³) | | | | W.R.A. (cc/m ³) |
|--|----------------|---------------|------------|------------|------------|--------------------------------|-----|-----|-----|--------------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G | |
| 45 | 15 | 8±1 | 4.5 | 51 | 50 | 175 | 343 | 825 | 818 | 858 |

Table 7.6 Mechanical Properties of Concrete

| Compressive Strength (N/mm ²) | Young's Modulus (kN/mm ²) | Tensile Strength (N/mm ²) |
|--|--|--|
| 43.4 | 32.4 | 3.86 |

Table 7.7 Layer Processes* and Design Values

| | 1 ply | | Additional Resin (kg/m ²) | Longitudinal Fiber Volume Fraction (%)** | Hardened Thickness |
|----|----------------------------|-------------|--|--|--------------------|
| | Resin (kg/m ²) | Fiber Sheet | | | |
| NR | 0.50 | CS | 0.30 | 18.6 | — |
| AR | | AS | | 18.7 | |
| FR | | C2 | | 13.3 | |
| | | CM | | 18.3 | |
| GR | 0.38 | GC | 0.38 | 6.40 | > 0.7mm |
| CR | 6.0 | — | — | — | > 3.0mm |

*All processes included concrete surface roughing and puttying. **For 1 ply layer

なお、曲げ試験に先立ち、CS または AS を 1 層用いた非浸漬の供試体各 1 体(測定箇所はそれぞれ 3 箇所)に対して建研式付着試験(40×40=1 600mm²の鋼製アタッチメントを使用、アタッチメント 4 辺の切込みは深さ 5mm 程度)を室温で行い、最大付着応力および破壊性状を確認した。

iii) 中性化深さ試験

6 ヶ月の浸漬および曲げ試験を終えた供試体について、支点より外側の FRP 層の剥離が発生していないコンクリート断面の中性化深さをフェノールフタレイン溶液により測定した。

2.4 ヒューム管の外圧補強効果

下水管路施設に適用されるヒューム管を対象として、健全および管内面ひび割れ発生後の供試管の内外面に対する種々の仕様の FRP 層による補強効果を外圧試験より検討した。試験要因を**Table 7.8**に示す。この試験は、JIS A 5303「遠心力鉄筋コンクリート管」に準拠して行った。

Table 7.8 Test Program for Hume Pipe

| Fiber Sheet | Resin | Fiber Layer | | Internal Crack |
|-------------|-------|------------------|------------|----------------|
| | | Internal | External | |
| CS | AR | 1, 2 plies | — | No |
| | | — | 1, 2 plies | |
| | | 1 ply | 1, 2 plies | |
| | NR | — | 1, 2 plies | |
| AS | AR | 1 ply | — | |
| | | — | 1 ply | |
| C2 | AR | 1, 2 plies | — | |
| | | — | 1, 2 plies | |
| CM | AR | — | 1, 2 plies | |
| GC | GR | 1, 2 plies | — | |
| | | — | 1, 2 plies | |
| — | CR* | Thickness=3, 5mm | — | |
| CS | AR | 1, 2, 3 plies | — | Yes |
| C2 | | 1 ply | | |
| CM | | 1, 2 plies | | |
| GC | GR | 1, 2 plies | | |
| — | CR* | Thickness=3, 5mm | | |

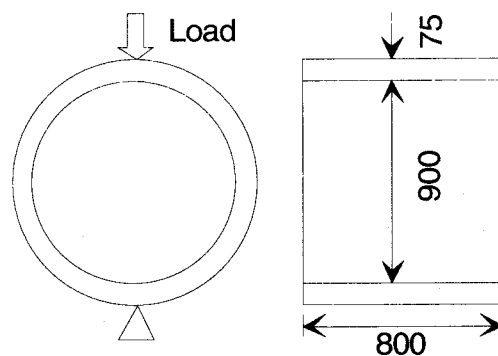
*Resin mortar.

a) 供試管とその作成

供試管には、外圧管 A 形 1 種(直管)で呼び径(内径)900 のものを 3 等分し、有効長を 800mm にしたものを用了。これらは型枠を 3 つに区切って同時に遠心成形した。管内面にひび割れを発生させる供試管では、b)に示す載荷方法で、FRP 層適用前にひび割れ発生荷重まで載荷した。FRP 層としては、主として CS に、耐酸性を期待して AR を組合せたものを用了、内面あるいは外面の円周方向全面に 1~3 層貼付けた。さらに、連続繊維シートとして AS、C2、CM または GC や、CR も用了。連続繊維シートは 1 周ごとに切断して用了、円周方向に 100mm、軸方向に 0~10mm 程度の重ね継手を設け、円周方向の重ね継手は各周で位置

をずらして集中しないようにした。各要因につき 1 体の供試管を作成し、供試管ごとの形状・寸法、コンクリート強度および配筋によるばらつきを極力減らすため、同時作成の 3 体のうち 1 体を無補強管に供して基準とした。供試体の形状・寸法の規格値を**Fig. 7.3**に示す。

コンクリートの示方配合および補強筋(軸筋と螺旋筋を溶接し格子状にしたもの)の機械的性質をそれぞれ**Table 7.9**, **Table 7.10**に示す。示方配合は JIS の推進管に用いるものを基本としたが、品質のばらつきを極力少なくするため、膨張剤は使用しないこととした。載荷時の圧縮強度は 54.5N/mm^2 であった。各 FRP 層の施工手順および設計値は曲げ試験と同様とした。



Lateral spiral: $\phi 5$ c.t.c. 47mm Longitudinal bar: 12- $\phi 5$

Fig. 7.3 Hume Pipe Specimen

Table 7.9 Mix Proportion of Concrete for Hume Pipe

| Target Strength f_{cr} (N/mm ²) | N.M.S. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit Mass (kg/m ³) | | | | | W.R.A. (cc/m ³) |
|--|----------------|---------------|------------|------------|------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------------------------|
| | | | | | | W | C | S | G15 | G20 | |
| — | 20 | 7±2 | 2.0 | 40 | 48 | 183 | 468 | 817 | 551 | 368 | 468 |

Table 7.10 Mechanical Properties of Reinforcing Steel

| JIS G 3532 | Diameter (mm) | Yield Strength (N/mm ²) | Young's Modulus (kN/mm ²) | Tensile Strength (N/mm ²) |
|------------|------------------|--|--|--|
| SWM-F | 5 | 492 | 165 | 558 |

b) 試験方法および測定項目

Fig. 7.3に示すように、品質管理試験に通常用いられる外圧試験を室温で行った。管軸方向

に均等な線荷重を荷重制御により静的に与え、ひび割れ発生時に一旦除荷し、再載荷して最大耐力まで漸増載荷を行った。載荷中はひび割れ・破壊性状の記録とともに荷重の測定を行った。

3. 連続繊維シート、樹脂およびFRP 板の耐酸性

3.1 連続繊維シート(CS)

引張強度およびヤング率の経時変化を、非浸漬のものを1としてFig. 7.4に示す。6ヶ月後も引張強度やヤング率の低下は見られず、良好な耐酸性能を有しているものと考えられる。

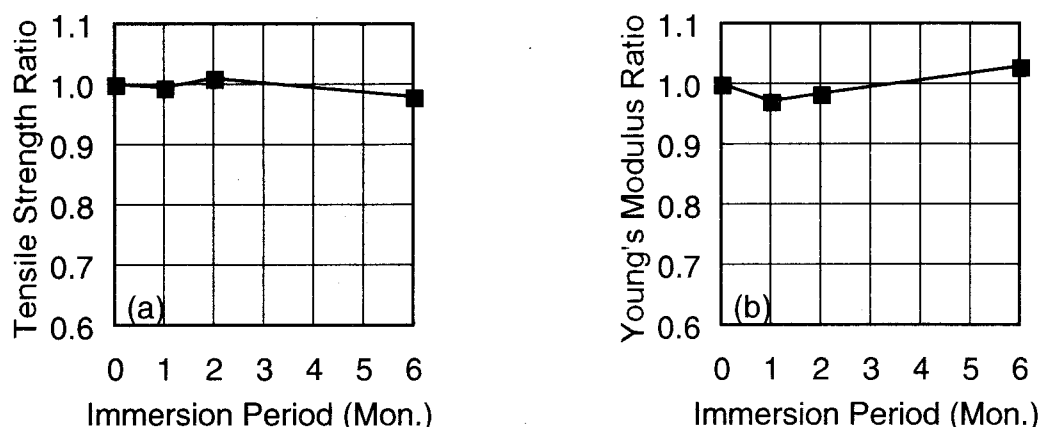


Fig. 7.4 Property Changes of Fiber Sheet (B: CS)

3.2 樹脂

引張強度、ヤング率および伸びの経時変化、ならびに質量変化を、非浸漬のものを1としてFig. 7.5に示す。樹脂の違いにより耐酸性の有意差が認められる。引張強度は、いずれの樹脂も低下しているが、ARでは1ヶ月以降での低下は比較的緩やかとなった。FRでは大きく低下し、6ヶ月後ではコンクリートの引張強度をかなり下回るようになった。ヤング率は、1ヶ月でいずれも大きく低下しているが、その後の挙動は樹脂ごとに異なったものであった。伸びは、NR、ARでは低下傾向となる時期があるが、6ヶ月後では増加し、NRで2.0%(CSの伸びと同程度、ASの半分以下)であった。質量変化は、引張強度の経時変化とよく対応しているようである。FRにみられるように、質量が1.5倍程度となった時には、ほとんどの引張強度が失われている。なお、浸漬後の目視観察によれば、いずれの樹脂も6ヶ月では、原

色のクリーム色から明らかに変色し褐色化していたが、目視可能な程度のひび割れや膨れは認められなかった。

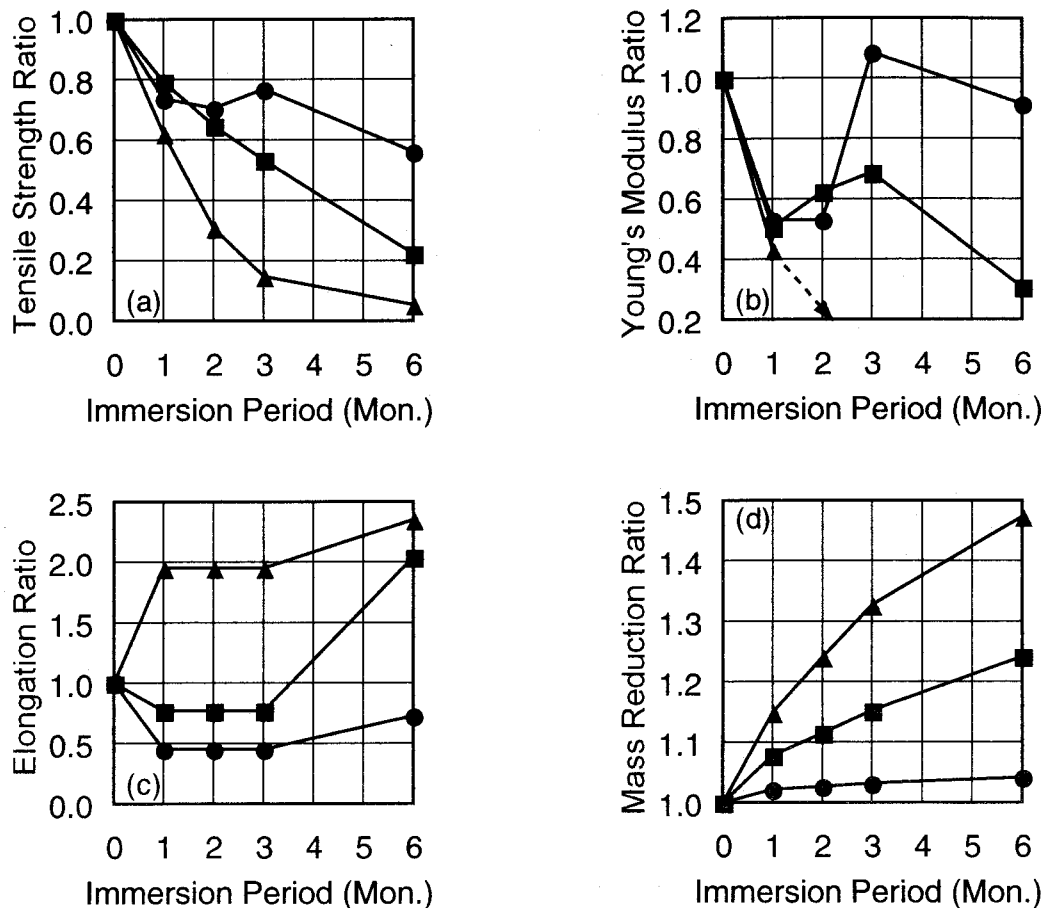


Fig. 7.5 Property Changes of Resins (B: NR, J: AR, H: FR)

3.3 FRP 板

引張強度およびヤング率の経時変化を、非浸漬のものを1としてFig. 7.6に示す。引張強度は、CS-NRではほとんど変化がみられず、連続繊維シートの値とほぼ同じであった。CS-ARやAS-ARでも6ヶ月後にそれぞれ4%、8%程度の低下にとどまっており、樹脂の試験結果と混合則を考慮すれば、FRP板の引張強度が主として耐久性に富む繊維に依存していることが確認できる。ARを用いた場合の若干の低下傾向については、原因は明らかではないものの、ARの伸びの浸漬による低下が影響した可能性も考えられる。すなわち、FRPとする場合は、樹脂の引張強度の低下に加え伸びの変化も併せて考慮して複合する必要があるものと思われる。一方、CS-FR(非浸漬)ではCSを用いた他のものより若干引張強度が小さかった。ヤング率は、いずれの繊維、樹脂を用いた場合も変化はほとんど認められなかった。ヤング率測

定時の応力レベルでは、引張強度に見られたような樹脂の影響と考えられる現象が発生しなかったものと考えられる。

以上より、CS あるいは AS を用いる FRP 板の耐酸性は、樹脂の違いやその劣化程度によらず、FRP 層に対して要求される引張特性についてはほぼ良好な結果となった。しかし、多層の連続繊維シートを用いる場合は、二次応力などによる樹脂から繊維への応力伝達の影響が大きくなることが予想され、その耐酸性にはさらに検討が必要であろう。

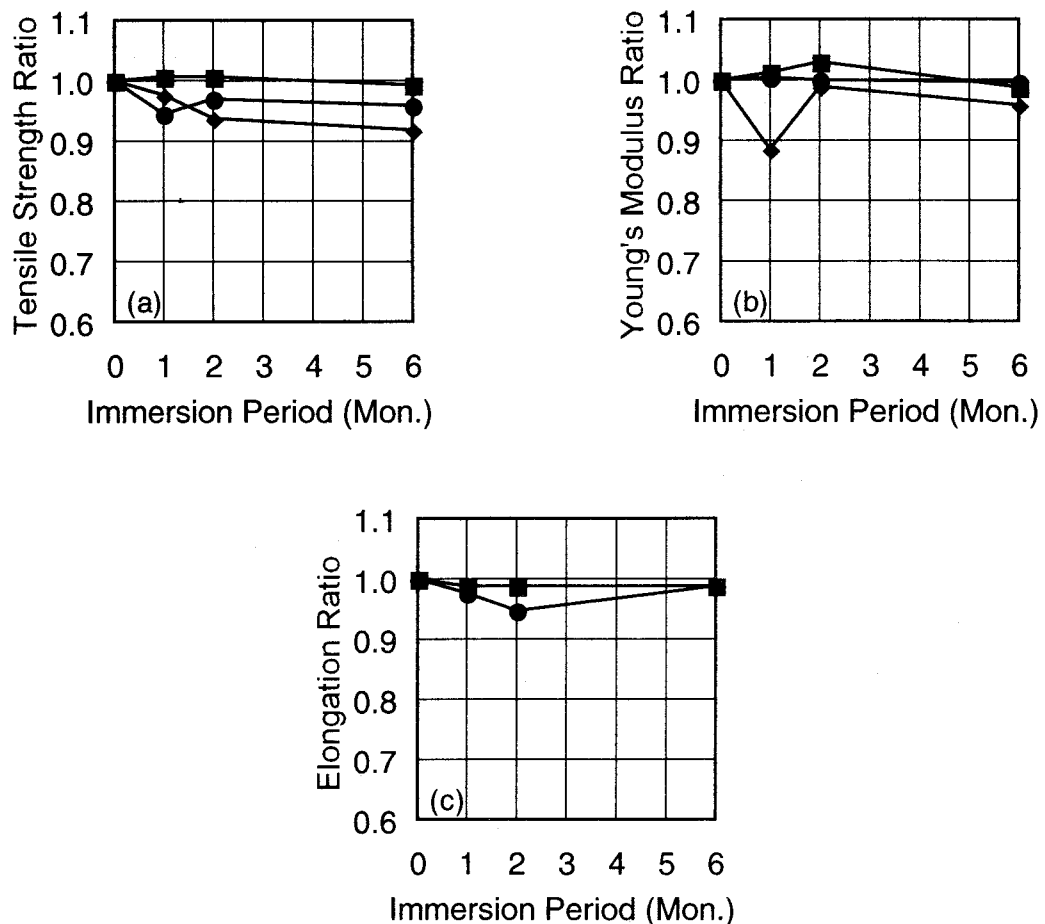


Fig. 7.6 Property Changes of FRP Plates (■: CS-NR, ●: CS-AR, ◆: AS-AR)

4. コンクリートの曲げ補強効果とその耐酸性

4.1 付着試験

付着破壊はすべて基盤コンクリートを伴ったものであり、アタッチメント面積で除して得た最大付着応力は $3.72 \sim 4.88 \text{ N/mm}^2$ とコンクリートの引張強度と同程度となった。樹脂の引張強度はいずれもコンクリートよりかなり大きいことをから、FRP 層はこの試験に対して最大の初期付着力を発揮したものと考えられる。したがって、連続繊維シートや樹脂の違いによる付着力の相違は明らかではなかった。

4.2 曲げ補強効果

a) ひび割れ性状と曲げひび割れ発生荷重

載荷終了後のひび割れ状況の一例を Fig. 7.7 に示す。CS または AS を用いた場合、曲げひび割れ発生後、耐力の増加とともにノッチを挟んで斜めひび割れが発生し、それが下縁から 10mm 程度以内での剥離ひび割れへと進展した。FRP 層の破断は見られず、剥離ひび割れが支点に達した時点で除荷し載荷を終了した。ほとんどの供試体では斜めひび割れに挟まれた三角形部分では顕著な剥離はみられないが、支点側では斜めひび割れが剥離を助長した傾向にある。ひび割れの角度により剥離程度が異なることが推察される。一方、GC や CR では曲げひび割れ発生とはほぼ同時に FRP 層が破断し、その後の耐力の増加はなかった。

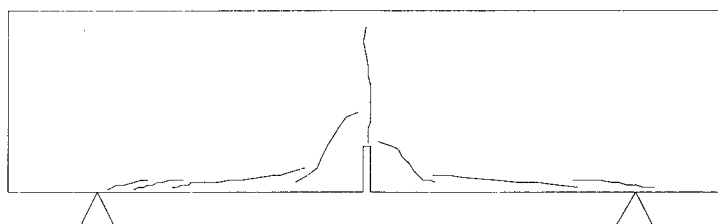


Fig. 7.7 Crack Pattern Exsample After Loading (CS-AR)

ノッチ先端における目視による曲げひび割れ発生荷重を、無補強のものを 1 として Fig. 7.8(a) に示す。また、連続繊維シートのみ単位幅当たりの軸方向引張剛性に対して表わしたものを Fig. 7.8(b) に示す。どの仕様も曲げひび割れ発生荷重が増大し、ひび割れ抑制効果がみられるが、ヤング率が高い CS が最も効果が大きく、その後の同一荷重時のひび割れ幅が最も小さくなった。曲げひび割れ発生荷重は軸方向 1 層の場合で CS が約 2 倍、AS では約 1.5 倍で、GC や CR を用いた場合も 1.5 倍程度の増加が認められた。軸方向 2 層では 1 層のほぼ

2 倍の効果があるのに対し、直交 2 層では軸方向の繊維量が同量であるため同程度であった。以上のように、FRP 層の軸方向引張剛性に比例して曲げひび割れ発生荷重は大きくなる。一方、樹脂の影響は比較的少ない。

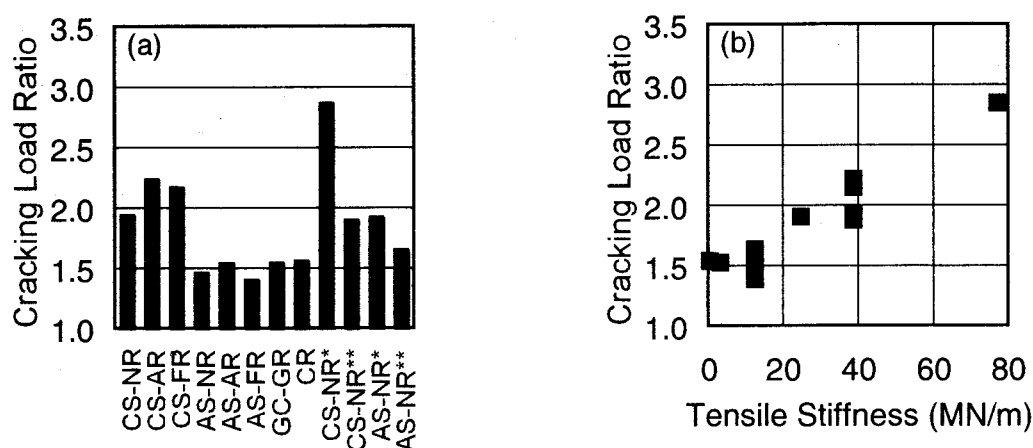
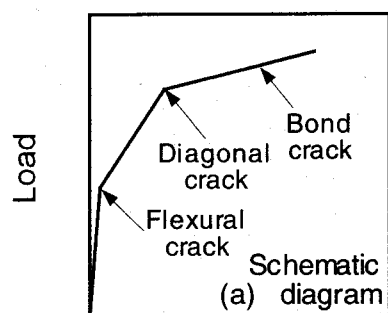


Fig. 7.8 Cracking Load Ratio (*0° 2 plies, **90° 2 plies)

b) 荷重—スパン中央たわみ

荷重とスパン中央たわみの関係を、樹脂を無視した平面保持による計算値とともにFig. 7.9に示す。CSやASを用いた供試体では、曲線は前述のひび割れ状況に対応して3領域に分類できるものが多かった。すなわち、Fig. 7.9(a)に示すように、曲げひび割れ発生以降は曲げ剛性の低下を伴うもののほぼ直線となるが、斜めひび割れ発生後は剥離によって荷重の増加は少なくなり降伏に似た挙動となっている。曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性はヤング率が高いCSで大きく、また載荷終了時までの耐力の増加も大きい。ASでは比較的柔なたわみ性状となっている。軸方向2層ではほぼ倍増し、耐力の増加はさらに大きくなるが、剥離ひび割れが顕著な時期には曲げ剛性は低下し軸1層と同程度となった。一方、樹脂の違いが曲げ剛性に与える影響はほとんど認められなかった。計算ではノッチを無視したため、実験値より曲げひび割れ発生までの曲げ剛性が大きく、また曲げひび割れ発生荷重は小さくなっている。その後の剥離開始までの曲げ剛性は、CSを用いた結果に対して若干大きく見積もる傾向が認められる。なお、計算上はいずれも曲げ圧縮破壊であり、最大荷重は実験値の2倍程度となることから、剥離の発生時を明確にしておく必要性が確認できる。



Max. Load (Calc., kN)

| | |
|------------|------|
| CS 1 ply | 88.0 |
| CS 2 plies | 112 |
| AS 1 ply | 56.4 |
| AS 2 plies | 74.2 |

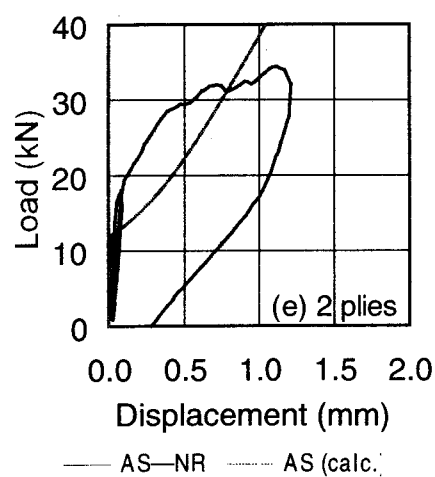
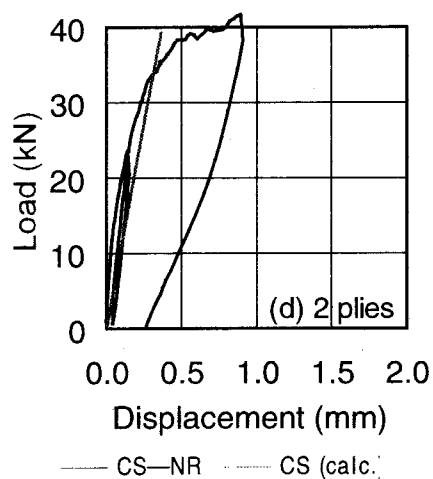
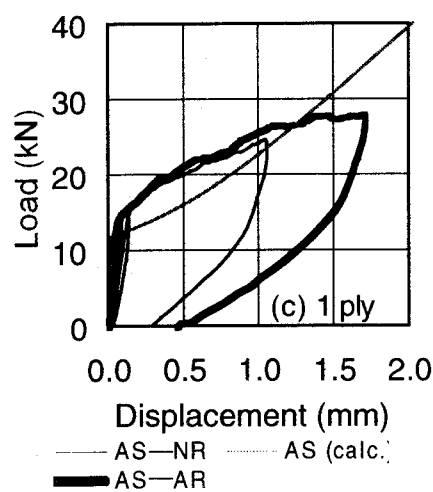
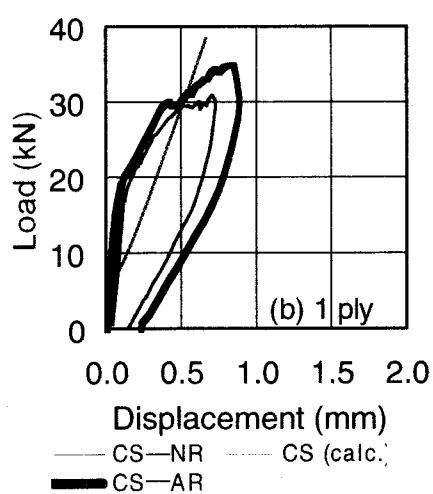


Fig. 7.9 Load-Displacement Curves

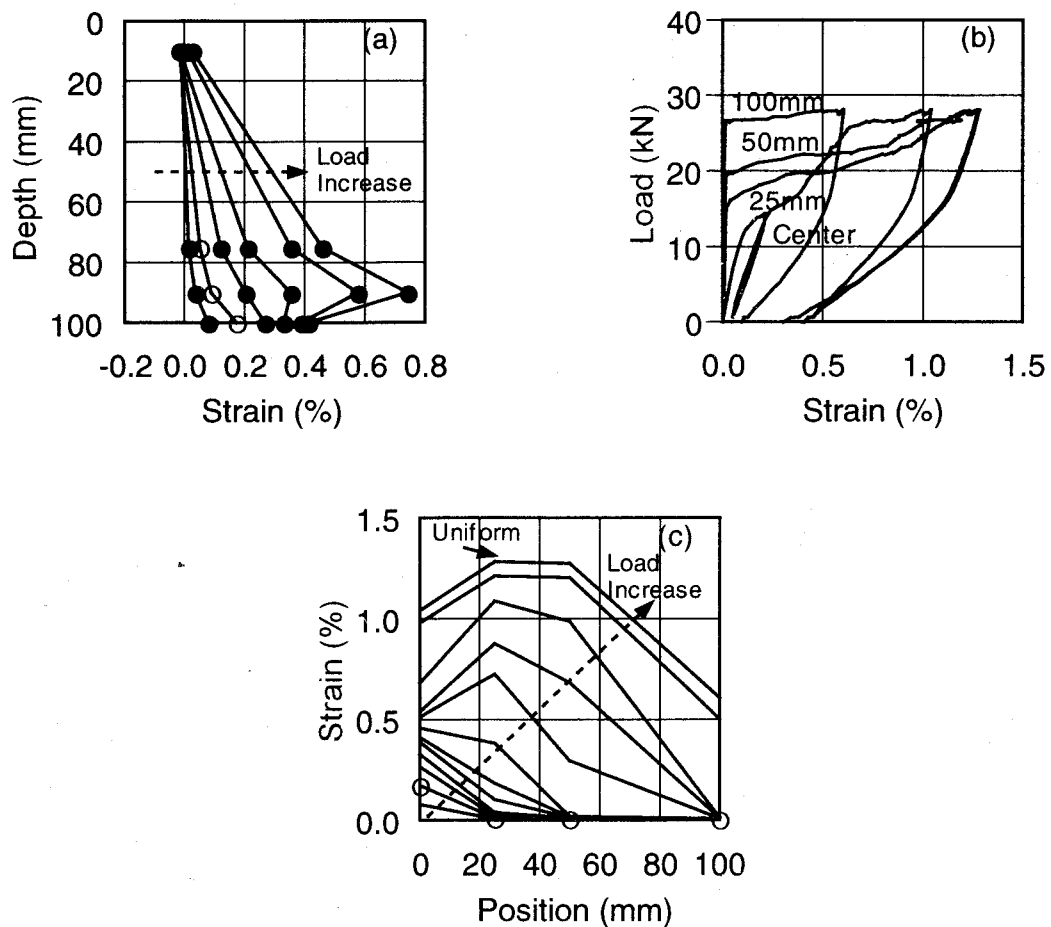


Fig. 7.10 Strain Distribution in Central Section and FRP Layer
(AS-AR, ○: Cracking Load)

c) 中央断面と FRP 層表面ひずみ

斜めひび割れ発生程度までの中央ひび割れ断面のひずみ分布を**Fig. 7.10(a)**に示す。この時期までは、目視では明確な剥離は観察されなかったが、平面保持は失われており、樹脂の変形、連続繊維シートの樹脂からの引抜け、コンクリートの変形が、また、荷重の増加に伴い剥離が相対変位の原因になっていると考えられる。このことがヤング率の大きい CS を用いた場合に曲げ剛性の計算値に上述の相違を与えると考えられるが、AS では影響は小さい。

d) FRP 層表面ひずみ

FRP 層表面のひずみを**Fig. 7.10(b)**に示す。中央では載荷開始直後から増加するが、中央から 25~100mm では順に急増点があり、FRP 層の剥離が支点に向かって進展した様子がうかがえる。

一方、**Fig. 7.10(c)**に示すように、中央部や支点付近以外の剥離ひび割れが顕著な領域では、載荷終了時にほぼ一定の値に近づく傾向にあった。そこで、載荷終了時までには FRP 層表面で

発生したひずみの最大値から得られる引張力により剥離に対する抵抗性を評価することにした。その値を破断荷重に対する割合とともにFig. 7.11(a)に、繊維のみの単位幅当たりの軸方向引張剛性に対して表わしたものをFig. 7.11(b)に示す。連続繊維シートの引張剛性が大きいほど負担できる引張力が大きくなっており、すなわち付着応力の積分値が大きくなることが分かる。このことにより、AS より CS で、また軸方向 1 層より 2 層で载荷終了時までの荷重の増加が大きくなっている。一方、引張剛性が 40~80MN/m ではほぼ同様の値を示し、頭打ちの傾向も認められ、耐力増加のための積層数には上限が存在するものと考えられる。この引張力は、片引きタイプの付着試験による既往の研究⁵⁾のうち同様に剥離により最大値となっているものより小さい傾向にあり、また引張剛性(積層数)の影響も小さい。これは斜めひび割れの発生が剥離ひび割れを誘発する傾向にあったためと考えられる。

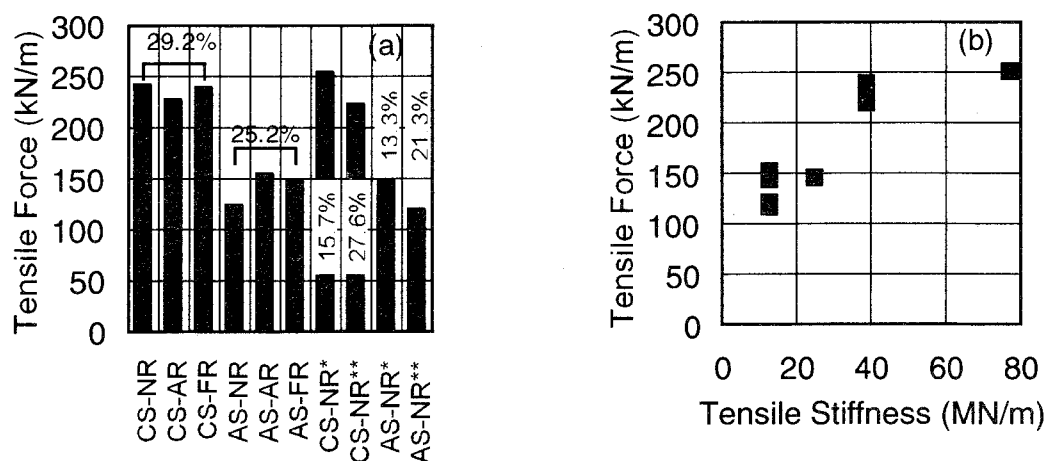


Fig. 7.11 Max. Tensile Force (*0° 2 plies, **90° 2 plies)

4.3 曲げ補強効果の耐酸性

a) 曲げ試験

ノッチ先端における曲げひび割れ発生荷重の経時変化を、同材令の無補強のものを 1 とし てFig. 7.12に示す。いずれの供試体も顕著な低下は認められないが、ヤング率が大きくひび割れ抑制効果が大きい CS に、ヤング率が低下した NR と FR を用いた場合で若干の低下傾向となった。曲げひび割れに伴う付着応力の発生に対して樹脂から繊維に伝達される応力が小さくなり、連続繊維シートの引張剛性を十分に発揮できなくなったものと考えられる。また、曲げひび割れ発生前にノッチ付近で剥離が発生していた可能性もある。

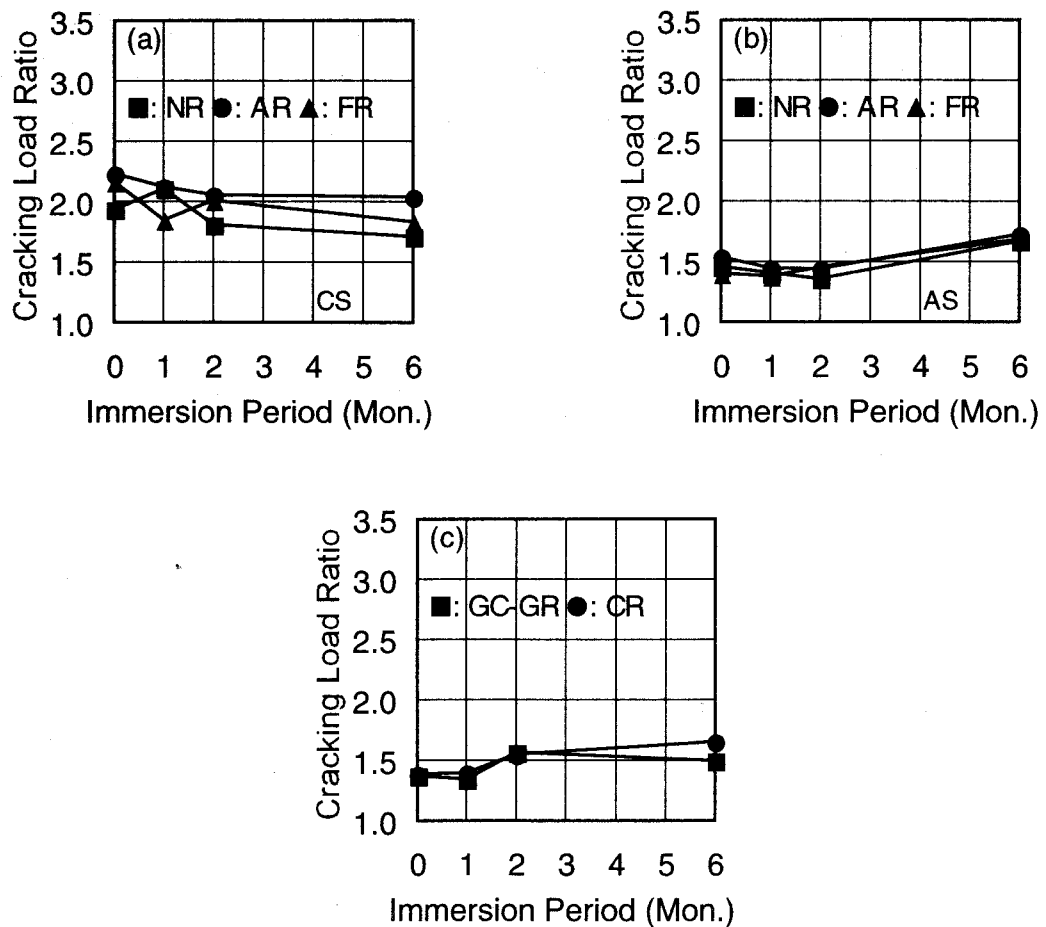


Fig. 7.12 Cracking Load Ratio

6 ヶ月の浸漬を行った供試体の荷重—たわみ曲線をFig. 7.13に示す。曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性には、ほとんど浸漬の影響は認められなかった。FRP層表面で発生したひずみの最大値から得られる引張力の経時変化をFig. 7.14に示す。浸漬によるヤング率の低下が大きい樹脂を用いた場合で増加する傾向が認められる。また、その傾向はASを用いた供試体で顕著であった。これは、同じ発生付着応力に対して樹脂の変形が大きくなる結果、逆に局部的には界面のずれ応力やコンクリートへの作用せん断力が小さくなり剥離が遅れたためと考えられる。加えて、付着応力の発生範囲が広がっていると考えられるので、ある程度の樹脂の劣化によるヤング率の低下はむしろ付着応力の積分値を増加する傾向になる可能性がある。

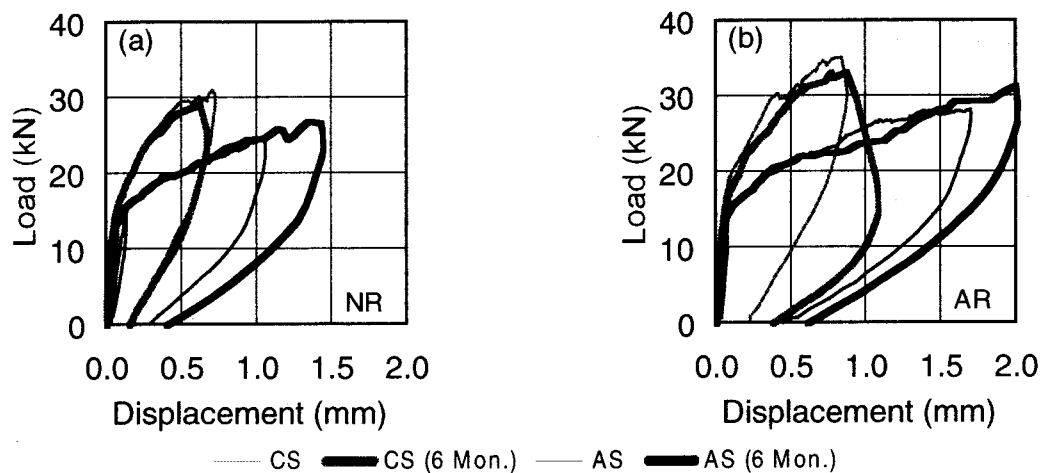


Fig. 7.13 Load-Displacement Curves

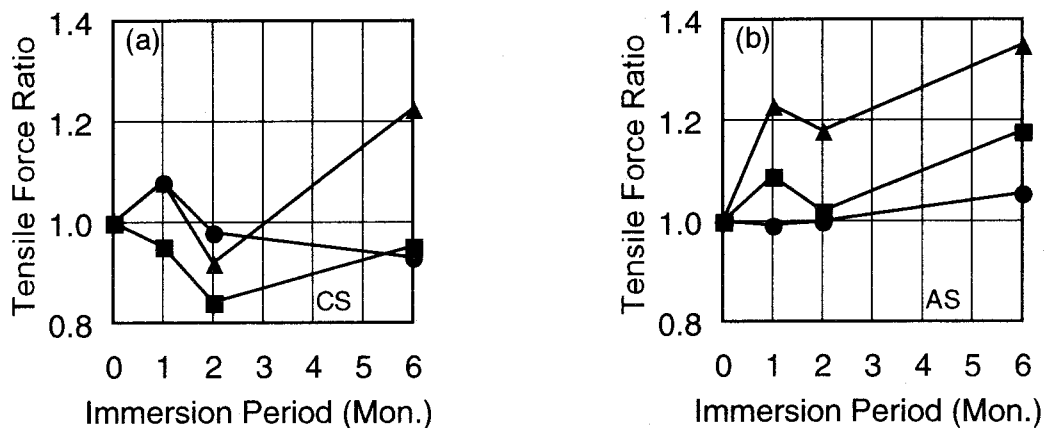


Fig. 7.14 Tensile Force Ratio (■: NR ●: AR ▲: FR)

b) 中性化深さ試験

連続繊維シート貼付け工法の耐久性には、FRP層自身の耐環境性能および接着安定性能に加え、防食被覆層としての環境遮断性能が重要である。浸漬供試体のFRP層にはいずれも割れやふくれは認められなかったが、NRやFRでは表面のつやがやや失われており、若干の変色が認められ、洗浄・乾燥後は表面に薄く白い粉が観察された。目視のため明らかでないが、環境剤の収着によりわずかに膨潤している可能性が考えられた。しかし、6ヶ月浸漬後の供試体のコンクリート部分の中性化深さはいずれの仕様の場合も0mmで、FRP層はコンクリートを適切に保護していた。樹脂単体での質量増加程度と比較して、樹脂層の厚みが小さいにもかかわらず浸漬の影響が少ないが、連続繊維シートにより樹脂の微細なひび割れが押さえられ、環境剤侵入に対する遮蔽効果があるものと推定される。また、そのため付着に与え

る影響も小さかったものと思われる。

4.4 連続繊維シートおよび樹脂の引張強度の影響

本研究の範囲では、供試体の破壊形式が剥離ひび割れの発生であったため、連続繊維シート
の引張強度が曲げ補強効果に与える影響は認められない。一方、浸漬後も含め樹脂の引張強
度は広範囲にわたったが、曲げ補強効果との相関性は確認できなかった。

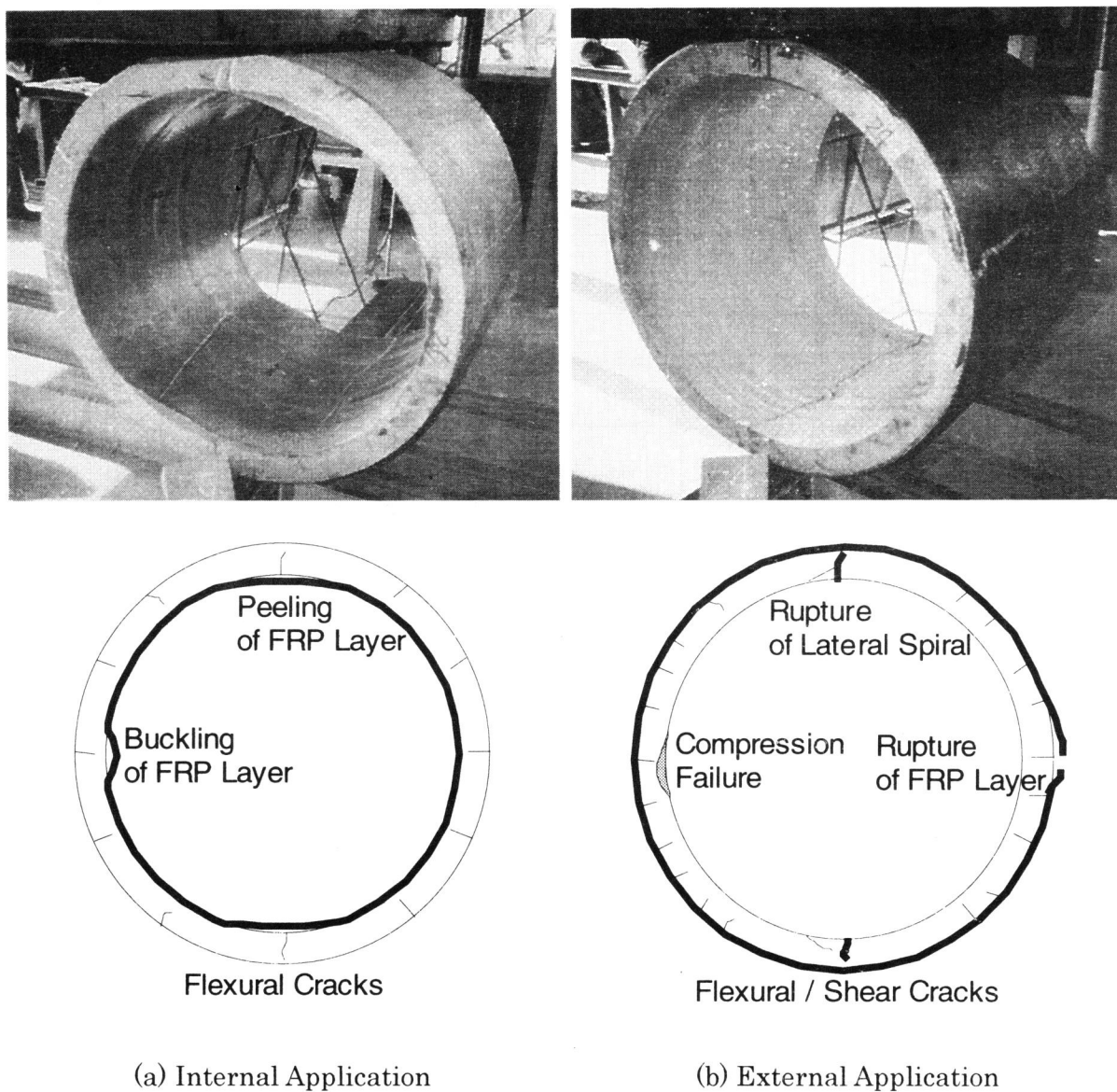


Fig. 7.15 Typical Failure Modes of Hume Pipes and Schematic Diagrams

5. ヒューム管の外圧補強効果

内面および外面補強管の載荷終了時の様子をFig. 7.15に、外面補強管の破壊形式の一覧をTable 7.11に示す。内面および外面補強とも重ね継手が弱点となることはなかった。

5.1 内面補強管

a) ひび割れおよび破壊性状

内面補強管では、無補強管と同様に、まず載荷点内側と、ほぼ同時に支点内側に、ひび割れが発生した。その後、左右外側を中心に軸筋間隔程度でひび割れが発生し、その付近の螺旋筋の降伏により決まる最大荷重以降も載荷した場合は、その破断により 2 分された。GC 以外の連続繊維シートを用いた場合、初ひび割れ以降、載荷点や支点内側から弦のように FRP 層の剥離が進展し、最大荷重時付近では左右内側で FRP 層が座屈する場合もあったが、載荷点や支点での破断はみられなかった。GC や CR はひび割れ発生とほぼ同時に破断した。

Table 7.11 Failure Mode of Externally Strengthened Hume Pipes

| Fiber Sheet | Resin | Fiber Layer Configuration | Failure Mode** |
|-------------|-------|---------------------------|----------------------|
| CS | AR | 1 ply | FRP Layer Rupture |
| | | 2 plies | Concrete Failure |
| | | 1, 2 plies* | FRP Layer Rupture |
| | NR | 1 ply | FRP Layer Rupture |
| | | 2 plies | Concrete Failure |
| AS | AR | 1 ply | Spiral Steel Rupture |
| C2 | AR | 1 ply | FRP Layer Rupture |
| | | 2 plies | Concrete Failure |
| CM | AR | 1, 2 plies | FRP Layer Rupture |
| GC | GR | 1, 2 plies | FRP Layer Rupture |

*Also with internal 1 ply.

**FRP layer rupture/concrete failure occurred at 90° and 270°. Spiral steel rupture occurred at 0° and 180°.

b) ひび割れ発生荷重および最大荷重

載荷点内側における目視によるコンクリートひび割れ発生荷重および最大荷重を、無補強のものを 1 としてFig. 7.16に示す。管内面にひび割れを発生させた供試管の値は、載荷中に再び荷重の一時低下を確認した時のものとした。曲げ試験と同様に、どの仕様についてもひび割れ発生荷重が増大し、また連続繊維シートの引張剛性にほぼ比例しており、曲げ試験での結果との整合性があった。しかし、引張剛性の増加は曲げ試験ほどの影響はなく、供試体

形状の相違に加えてヒューム管の場合に内面に生成されやすい脆弱部をさらに処理する必要性があるものと考えられる。また、管内面ひび割れを有する場合も、内面へのFRP層の適用により健全な供試体と同程度に回復できることがわかる。一方、剥離または破断が発生した後に鉄筋が降伏する破壊形式のため、最大荷重に対する補強効果は認められなかった。

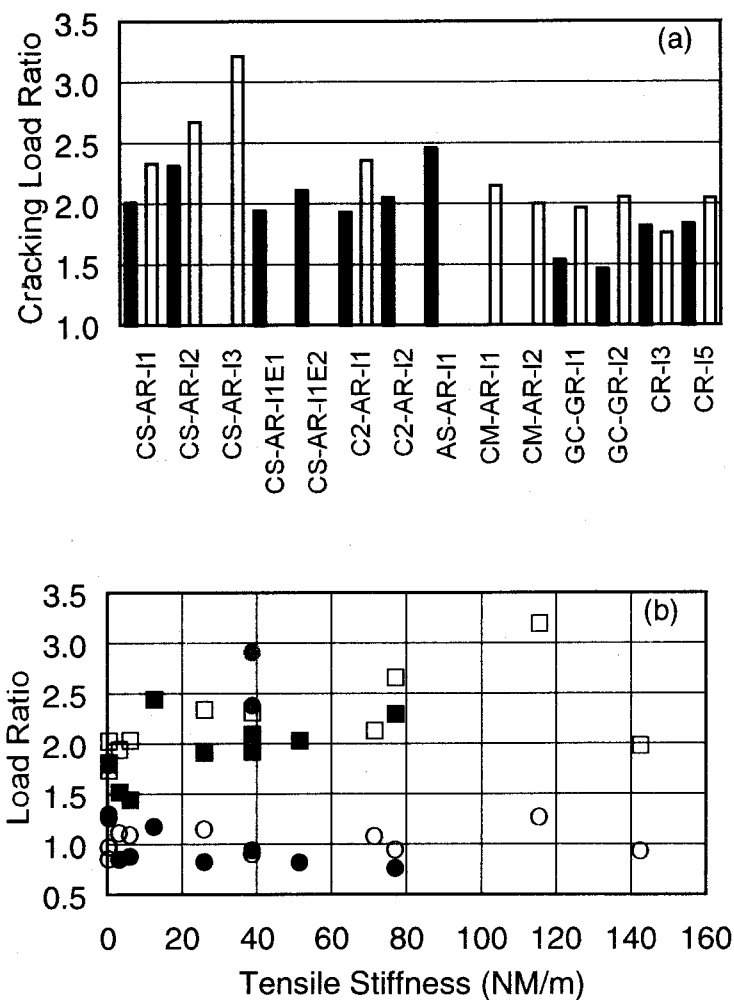


Fig. 7.16 Load Ratio

(I: Internal application, Number: Layers Number or thickness)

Cracking load ■: no internal crack, □: with internal crack
 Maximum load ●: no internal crack, ○: with internal crack
 ●: no internal crack with external application

5.2 外面補強管

a) ひび割れおよび破壊性状

外面補強管では，左右外側のひび割れ分散性が向上していることが，断面における目視により確認できた．CS または C2(HS タイプ)を用いた場合，1 層(それぞれ 300, 200g/m²)では左右外側で FRP 層の破断，2 層(それぞれ 600, 400g/m²)では左右内側でのコンクリートの圧潰により最大荷重となり，CM(HM タイプ，300g/m²)では 1, 2 層ともに FRP 層が破断した．AS では大きな変形の後，載荷点と支点で螺旋筋が破断した．載荷点あるいは支点を起点とするせん断ひび割れを伴った供試管もみられた．

b) ひび割れ発生荷重および最大荷重

載荷点内側における目視によるコンクリートひび割れ発生荷重および最大荷重を，無補強のものを 1 として Fig. 7.17 に示す．最大荷重はいずれもが増加しており，FRP 層の破断で最大となる場合はその破断荷重に比例している．一方，内面補強を併せて行った供試管を除き，ひび割れ発生荷重に対する補強効果は認められない．

5.3 ヒューム管の外圧補強効果

FRP 層の管内面への適用は，主として既設管を対象としたものであり，管内の劣化要因から管を保護するとともに，ひび割れの発生・進展を防ぐことを意図したものである．一方，外面への適用は新設管のみを対象としたものであり，主として上載荷重に対する耐力の向上を目的としたものである．本研究の範囲では特定の対象供試管に対する限られた種類の FRP 層の適用を検討したに過ぎないが，試験結果は用いた FRP 層によりこれらの補強効果が得られていることを示している．内面補強は，ひび割れ発生荷重の増加に加え，FRP 層が破断しなかったため漏水防止効果も期待できる点で既往の防食被覆工法より優れている．外面補強は FRP 層の引張強度を有効に利用する手段の一つになる．また，内外面ともに適用することにより，両者の効果が得られた．

FRP 層の実際の適用にあたっては，さらに検討すべき内容もある．例えば，劣化したコンクリート脆弱層の除去処理の程度や，未除去の劣化因子および非貼付け面からの物質の浸透が補強効果に与える影響等を明らかにする必要がある．また，地震時を含め実際の荷重状況における補強効果を，外面補強量との関連のもとで検討する必要がある．

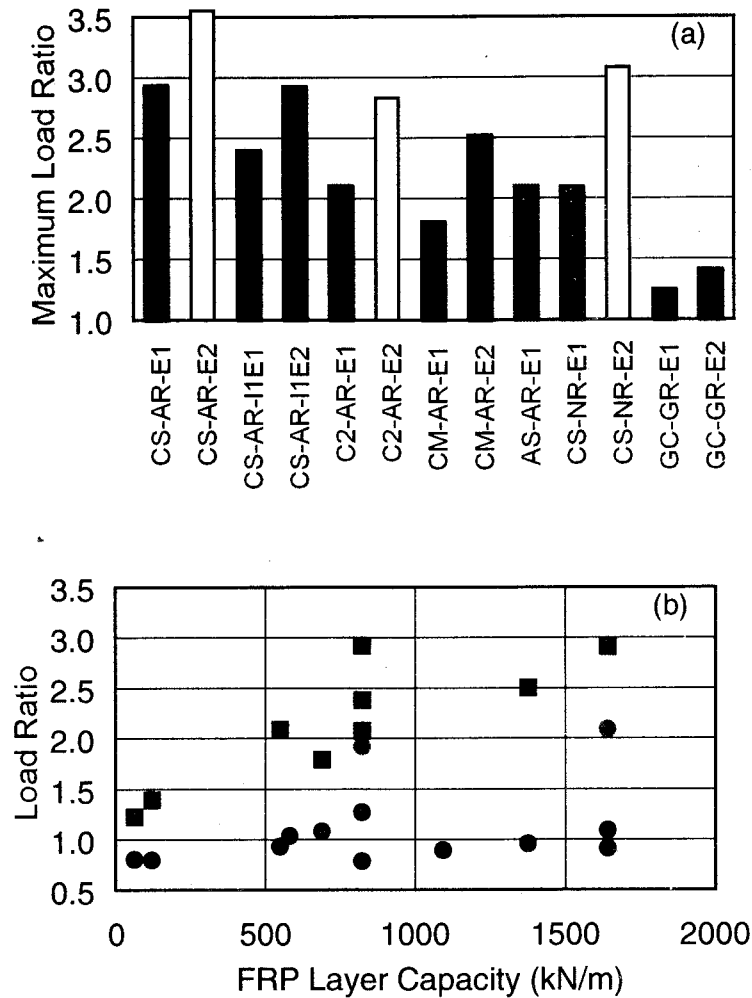


Fig. 7.17 Maximum Load Ratio

(E: External application, Number: Layers number)

Maximum load ■: FRP layer rupture, □: Concrete failure,

■: Spiral steel rupture

Cracking load ●, ●: also with internal application

6. 本章のまとめ

連続繊維シート貼付けによる下水道コンクリートの補修・補強効果ならびにその耐酸性を、構成材料から実大レベルの供試体までの載荷試験から確認した。連続繊維シート貼付け工法には適用可能な材料が多く存在し、また複合材料として用いるため、材料選定には十分留意

する必要がある。本研究で用いた材料はいずれも補修・補強効果を有していたが、それぞれ特徴があり、ひび割れ、変形、破壊性状および耐酸性において選定基準が設定できるものと考えられる。

本研究の範囲内で得られた主な知見をまとめて結論とする。

- (1) 樹脂の種類より硬化物の力学的性質、耐酸性に差あるが、連続繊維シートを用いた FRP、コンクリート供試体の力学的性質に対して樹脂の違いによる有為差は見られなかった。
- (2) 連続繊維シートの引張剛性の増加は、曲げひび割れ発生荷重、その後の曲げ剛性および剥離ひび割れ進展時の最大引張力を増加させる。樹脂のヤング係数の影響は小さいが、連続繊維シートの引張剛性が大きい場合に曲げひび割れ発生荷重と最大引張力に影響がある。これらの効果はコンクリートのひび割れ状況の影響を受ける。一方、10%硫酸水溶液への6ヶ月間浸漬ではこれらの効果の変化は小さく、FRP層によりコンクリートが酸に対して保護され、FRP層自身が受けた影響も、曲げ性状に顕著な影響を与えるものではなかった。
- (3) ヒューム管の内面補強はひび割れ発生荷重を増加させる。その効果は曲げ試験と同様引張剛性により整理でき、管内面にひび割れを有する場合も耐荷性状は健全なものに近くなった。また、FRP層は破断せず、漏水防止効果を有するものと考えられる。一方、外面補強は最大荷重を増加させる。FRP層の破断が最大荷重を決める場合、その効果は破断荷重により整理できる。
- (4) 連続繊維シート貼付け工法は、耐酸環境での補修・補強効果の低下が少なく、下水道コンクリートへの適用が有効であると考えられる。内面補強は、ひび割れ発生荷重の増加に加え、FRP層が破断しなかったため漏水防止効果も期待できる点で既往の防食被覆工法より優れている。外面補強はFRP層の引張強度を有効に利用する手段の一つになる。また、内外面ともに適用することにより、両者の効果が得られた。

参考文献

- 1) 例えば, 緒方 紀夫, 安藤 博文, 松田 哲夫, 小畠 克朗, 大野 了: 炭素繊維による段落し部を有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究, 土木学会論文集, No.540/V-31, pp.85-104, 1996.6.
- 2) 例えば, 木下 勲: 下水道管のコンクリート腐食, セメント・コンクリート, No.577, pp.14-19, 1995.3.
- 3) 宮川 豊章: 下水道施設のコンクリート防食について, 防水ジャーナル, 第 261 号, pp.42-45, 1993.9.
- 4) 日本下水道事業団: コンクリート防食指針(案), 1993.6.
- 5) 例えば, 浅野 靖幸, 佐藤 靖彦, 上田 多門, 小野 定: 炭素繊維シートの付着特性について, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, JCI 北海道支部, pp.75-80, 1996.11.
- 6) 奥田 聰: プラスチックによる防食技術, 日刊工業新聞社, 1982.
- 7) 大石 不二夫, 成沢郁夫: プラスチック材料の寿命—耐久性と破壊—, 日刊工業新聞社, 1987.
- 8) Hull, D.(宮入 裕夫, 池上 浩三, 金原 勲 訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
- 9) コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説/コンクリート床版防水工設計施工指針(案)・同解説, 阪神高速道路公団・日本材料学会, 1989.3.
- 10) 久保 忠雄, 西澤 宏: 下水道施設の防食被覆の耐久性に関する調査, 第 31 回下水道研究発表講演集, pp.234-236, 1994.7.
- 11) (財)鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.7.
- 12) Hawkins, G. F., Pattel, N. R. and Steckel, G. L.: Failure Analysis of Highway Bridge Column Composite Overwraps, Proc. of the 1st Intl. Conf. on Fiber Composites in Infrastructure, pp.1126-1140, 1996.
- 13) 岡野 素之, 中西 克佳, 田中 常雄, 小畠 克朗: シート状炭素繊維を貼付て補強した既存部材の耐久性に関する試験, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.444-445, 1991.
- 14) 小松 憲一, 田中 良典: 繊維強化シートによる円筒状構造物の補強実験, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, pp.372-373, 1992.
- 15) 佐野 正, 三浦 尚: 鋼板によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.117-129, 1996.11.

第8章 結 論

本論文は、連続繊維補強材をコンクリート構造物に適用するにあたり、供用中の信頼性を確保するため明らかにする必要がある、種々の環境下での連続繊維補強材自身の物理的・機械的性質の長期性状、および、連続繊維補強材のコンクリートとの付着の長期性状に関する一連の研究をとりまとめたものである。以下に、それらの研究から得られた結論を総括する。

「第3章 連続繊維棒材の耐アルカリ性と引張性状」では、連続繊維棒材を対象とした。コンクリート中における連続繊維棒材の引張特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、コンクリート中への埋設を考慮して、主としてアルカリ環境を取り上げた。コンクリート中を模擬したアルカリ溶液中に、高温・引張応力の存在下で連続繊維棒材を浸漬する促進試験を行い、巨視的・微視的な手法で表面や断面の変状を観察するとともに、引張強度、弾性係数、伸びやリラクセーションといった引張特性への影響を明らかにした。さらに、浸漬後の連続繊維棒材を用いたプレストレストコンクリート部材を作成し、その曲げ性状の変化から、コンクリートとの付着特性への影響を含めて長期性状を評価した。

代表的ないくつかの種類の連続繊維補強材について、9000時間程度までの緊張および浸漬を行った結果、引張強度等の力学特性の顕著な低下は認められず、コンクリート中よりも厳しい促進劣化環境であることを考慮すれば、ほぼ良好な耐久性が確認された。しかし同時に、現在の時点では力学特性に顕著には現れないものの、性能低下につながる可能性のある内部組織の変化もまた認められた。

内部組織の変化は、主として繊維とマトリクス樹脂の界面に生じるき裂として生じた。このことは、連続繊維補強材がFRPの一種であり、繊維のみあるいはマトリクス樹脂のみの劣化過程をそれぞれ単独に検討することでは、連続繊維補強材の耐久性を考えるうえで不十分であることを意味している。

以下に、本章の範囲内で得られた主要な結果を要約して示す。

- (1) アルカリ溶液は水道水に比べて劣化に与える影響が大きい。アルカリ金属である K と Na は連続繊維補強材の内部に浸入する際、類似した挙動を示し、Kの方が浸入傾向が強い。これに対し、アルカリ土金属である Ca は、表面付近や大きなき裂が存在するところにのみ集中して存在し、他の2つのイオンに比べて連続繊維補強材の内部に浸入する傾向は弱い。
- (2) 環境温度 60℃では、20℃と同種の形態で劣化が促進され、促進温度として有用である。
- (3) 平行繊維を束ねたアラミド T 棒材の場合、緊張荷重がなければアルカリ溶液の浸入は表面近くに留まり、き裂も表面近くのみで発生する。これに対し、緊張されている場合、

アルカリ溶液の浸入はより内部にまで達し、き裂も同様により内部に進む傾向にある。引張性状については繊維自体の高い耐久性と繊維配向の良さから安定した性状を示すが、部材レベルでは課題を残している。

- (4) 炭素については表面層の劣化に留まっているが、表層樹脂や巻き付け繊維の劣化が棒材の機械的性質の低下として現れるものと考えられる。アラミドK棒材についても浸入傾向は低く、組紐形状による利点も見られるが、繊維自体の強アルカリ下での耐久性に若干の問題があるとされるため、今後課題を残している。
- (5) 連続繊維補強材の単純な引張強度はあまり低下しない場合でも、連続繊維補強材の性能低下の影響が部材性能に現れる場合がある。

「第4章 連続繊維棒材の耐アルカリ性とコンクリートとの付着性状」では、第3章と同じく連続繊維棒材を対象とした。第3章の結果を受けて行った連続繊維棒材の付着特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、コンクリート中への埋設を考慮して、主としてアルカリ環境を取り上げた。第3章と同様の促進試験を用い、コンクリートとの付着に与える影響が大きいと考えられる、連続繊維棒材を構成する樹脂に着目した検討を行った。樹脂や連続繊維自身に対する各種の分析に加え、片引き試験により付着特性の長期性状を評価した。

連続繊維棒材や樹脂板を水道水やアルカリ溶液に浸漬すると、通常環境における数ヶ月のあいだにでも吸水による質量変化が発生した。中でもFRPである連続繊維棒材では、繊維と樹脂の界面が存在することから、界面への吸水が原因と見られる、樹脂板よりも大きな質量変化を示す場合が認められた。これらの質量変化には温度の影響が顕著であり、アルカリの存在の影響が認められる場合もあった。しかし、いずれの場合も質量変化率は数パーセント程度と小さく、また平衡吸水状態に至り安定するものがほとんどであった。そしてその結果、微小硬度やコンクリートとの付着性状の経時変化は顕著ではなかった。ただし、本研究の試験期間内で平衡吸水状態に至っていない連続繊維棒材や、促進環境下で溶出により質量が減少し、コンクリートとの付着性状にも若干の変化が認められたものも存在し、また、平衡吸水状態以降の挙動は明らかになっていない。このことから、さらに長期の検討が必要であることが確認される。

以下に、本章の範囲内で得られた主要な結果を要約して示す。

- (1) 連続繊維棒材に用いられる樹脂で作製した樹脂板を、水道水とアルカリ溶液中に3ヶ月まで浸漬した結果、温度による促進効果が認められ支配的であった。いずれの樹脂板も環境液による差は見られず、樹脂単体の場合には、アルカリ劣化と思われる質量変化は見られなかった。また、質量変化率も3%以下であった。
- (2) 連続繊維棒材を、水道水中とアルカリ溶液中に5ヶ月まで浸漬した結果、樹脂板より質

量変化率が大きくなる場合が認められた。比較的薄い表面樹脂部分への環境剤の浸入と、それに続く繊維・樹脂の界面あるいは内部に存在する空隙への浸入が生じたためと考えられる。また、アルカリ溶液中では、水道水中の場合には見られない質量減少あるいは増加を示す棒材がみられた。アルカリにより加水分解が促進され、環境液への溶出、きれつ発生による内部への環境液の浸入の加速、あるいは棒材表面へのアルカリ成分の収着といった劣化機構が推察される。

- (3) 樹脂板と連続繊維棒材の表面および断面樹脂部の微小硬度の測定を行った結果、樹脂の種類により微小硬度に差が見られ、また繊維と樹脂界面の領域では若干微小硬度が小さい場合が認められた。しかし、アルカリ溶液中での質量変化の測定において、アルカリによる劣化と思われる質量変化を示した連続繊維棒材も含め、表面や断面樹脂部の微小硬度はほとんど変化せず、微小硬度に現れる程度の劣化は起こっていない。
- (4) 自由端変位が 0.05mm など比較的小さい時に発生する平均付着応力 $\bar{\tau}_{0.05}$ には、連続繊維棒材の表面に存在する樹脂の変形の影響が大きく、コンクリートの変形の影響が小さい。このため、連続繊維棒材そのものの変状を片引試験により評価するときには、この平均付着応力にも着目することが有効である。
- (5) 連続繊維棒材を、直接アルカリ溶液中に 5 ヶ月まで浸漬した結果、 60°C で浸漬を行った場合で、棒材の表層部のアルカリ劣化による溶出が原因と思われる付着指標の低下傾向を示すものがみられた。一方、連続繊維棒材をあらかじめコンクリート中に埋設し、6 ヶ月まで自然環境へ暴露あるいはアルカリ溶液中に浸漬した結果、6 ヶ月では付着指標に若干の低下傾向が認められる場合があるものの、すべての場合で非浸漬のものより低下することはなかった。これらの結果から、いずれの連続繊維棒材もアルカリ環境における付着の耐久性は高いと判断できる。
- (6) $\bar{\tau}_{0.05}$ およびコンクリート強度による補正を行った $\bar{\tau}_{\max}^*$ を用いて、連続繊維棒材の溶出傾向($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の低下)や平衡吸水状態($\bar{\tau}_{0.05}$ および $\bar{\tau}_{\max}^*$ の安定)という劣化メカニズムの区別を推定できたものと考えられる。

「第 5 章 連続繊維棒材の引抜き荷重下での付着特性とその長期性状」では、第 3 章、第 4 章と同じく連続繊維棒材を対象とした。第 4 章と同じく連続繊維棒材の付着特性の長期性状に関する研究であるが、影響を与える要因としては、主として、ひび割れ近傍における連続繊維棒材への引抜き力の発生を考慮して、供用中にわたり持続的に作用する付着応力の作用を取り上げた。片引きによる引抜き試験を行い、付着応力分布の定量化を行うとともに、持続付着応力を片引きで与える付着クリープ試験を行い、その長期性状を評価した。

連続繊維棒材は、ヤング率が鋼材より小さいことから、RC 曲げ部材の補強筋として用いると、補強筋量によっては静的な荷重下でもひび割れやたわみが大きくなる。そのため、PC 用緊張材として用いることが主として考えられてきた。本研究で用いた炭素より線およびアラ

ミド異形棒では、18,000 時間程度までの持続引拔荷重下において、付着クリープによる顕著な荷重端変位の増加が認められ、長期的性状を考慮しても、同様に PC 用緊張材としての利用が推奨される結果となった。

本研究から得られた結果をまとめて結論とする。

- (1) 同じ引拔荷重における荷重端変位は、表面形状、表面に存在する樹脂およびヤング率の影響により、異形鉄筋(D6)<炭素より線($\phi 7.5$)<アラミド異形棒($\phi 6.0$)の順で大きい。最大引拔荷重以降では、炭素より線はコンクリート界面に形成された溝に沿って急激な引抜けを示し、アラミド異形棒は異形鉄筋と似た引抜け性状であった。ただし、同一の棒材では、付着長の違いによらず、自由端変位が現れるまでの引拔荷重－荷重端変位関係はほぼ等しく、この段階では付着応力分布やすべり分布が等しいものと考えられる。
- (2) 炭素より線およびアラミド異形棒において、自由端変位発生時の引拔荷重/破断荷重と付着長/公称直径の関係は、両棒材ともほぼ同様の傾向を示した。両棒材の定着長は、66.7D 程度であった。
- (3) 炭素より線およびアラミド異形棒の付着応力分布より、炭素より線では最大付着応力が発生する位置の荷重端からの距離が長く、潜在的に持つ付着性能を十分に発揮するためには、アラミド異形棒以上の付着長が必要であることが示された。しかし、両棒材ともほぼ同様の概形であり、また、異形鉄筋の場合に見られるものと同様であった。
- (4) 炭素より線およびアラミド異形棒においては、いずれも荷重端変位増分の増加は持続引拔荷重載荷後 24 時間で顕著に現れた。また、保証破断荷重の 20%の持続引拔荷重を与えた場合の荷重端変位増分は、10%のもののおよそ 2 倍となった。その後、約 10,000 時間(約 1 年)までは増加を示しているが、それ以後は一定値に収束し安定する傾向にある。
- (5) 荷重端変位増分からコンクリートの収縮量の 1/2 を差し引いた値を付着クリープの目安として評価すると、炭素より線よりアラミド異形棒で付着クリープが大きく、また、付着クリープが荷重端変位増分に占める割合も大きくなり、表面に存在する樹脂の変形が影響したものと考えられる。
- (6) 連続繊維棒材を用いた部材の長期経過後のひび割れ幅やたわみを検討する際に、付着クリープの影響を考慮する必要がある。しかし、ひび割れ幅、たわみあるいは振動の制限値や、疲労を考慮すれば、連続繊維棒材をコンクリート部材に用いる場合は、使用状態でひび割れを発生しない程度にまで抑制し、連続繊維棒材の引張応力の増分を制限することで、付着クリープが微小となるように設計することが必要であると考えられる。

「第 6 章 連続繊維補強材の定着付着および曲げ付着とその長期的性状」では、連続繊維棒材と連続繊維シートを対象とした。第 5 章と同様に、影響を与える要因としては、供用中にわたり持続的に作用する付着応力の作用を取り上げているが、第 5 章が曲げ付着を模擬した

引抜きによる付着特性の検討であるのに対し、プレテンション PC 部材を用い、その緊張材として用いる場合の定着付着特性と、曲げ荷重下での曲げ付着特性の長期性状に関する検討を行った。これらの付着の定量化を行うとともに、定着後の挙動あるいは持続曲げ荷重に対する挙動により、それらの長期性状を評価した。

本研究から得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) アラミドより線、アラミド組紐および炭素より線の伝達長は PC 鋼より線より短い、部材端変位が大きくなる。伝達長に与えるヤング係数および最大付着応力の影響が大きいためと考えられる。また、アラミドシートでは導入直後にコンクリートの付着したシートがめくれ上がる状態で剥離したものがあつた。アラミドシートの厚みにより面外方向に剥離(Peel)荷重が作用し、脆弱なモードで破壊したためと考えられる。
- (2) 導入後の部材端変位増分は、比較的大きいアラミドより線でも載荷後約 10 日で微増あるいは一定値に漸近し、プレテンション用緊張材として用いる場合は、長期性状は比較的安定しているものと考えられる。
- (3) 比較的すべりが大きく現れたいくつかの位置での(τ , S)の経時変化を、導入直後から16日間にわたってプロットした結果、導入後のそれぞれの位置における(τ , S)は、 τ が最大値を迎えていたため τ が小さくなるとともに S が大きくなっており、右下がりの軌跡を描いていた。しかし、いずれの位置においても、その軌跡は、導入時の τ - S 関係に従ったものになっており、この期間内では、 τ - S 関係に顕著な違いは現れていなかった。
- (4) 導入時と曲げ載荷時で、緊張材軸力の増減が同じ段階でのすべりを比較すると、端部ではほぼ等しいすべりとなっているものの、すべりが生じている区間は曲げ載荷時が長く、導入時より最大付着応力が大きくならないうちに、付着応力が内部に伝達されていた。
- (5) 曲げ載荷後のひび割れ幅はアラミドより線で測定期間中は増加しており、導入後の部材端変位増分の経時変化と異なる。また、アラミドシートでは、等しいシートの軸力増減で、載荷直後あるいは導入直後の各すべりおよびこれらの経時変化はほぼ等しく、アラミドシートでは定着性状と曲げ載荷での付着性状およびこれらの長期性状はほぼ等しいものと考えられる。

「第 7 章 過酷環境下における連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強」では、連続繊維シートを対象とした、連続繊維シート自身の引張特性の長期性状、および、連続繊維シートで補強した曲げ部材の耐荷特性の長期性状に関する研究であり、影響を与える要因としては、代表的な苛酷環境である下水道施設のコンクリートへの適用を考慮して、主として酸を取り上げた。連続繊維シート、樹脂およびそれらを用いて作成した FRP 板を酸性溶液中に常温で浸漬する促進試験を行い、引張強度、弾性係数、伸びやリラクセーションといった引張性状への影響を明らかにした。さらに、連続繊維シートを用いて曲げ補強した

供試体に対して同様の浸漬による促進試験を行い、耐荷性状の変化から、コンクリートとの付着性状への影響を含めたかたちで長期性状を評価した。加えて、連続繊維シートの下水道施設への適用例として遠心力鉄筋コンクリート管(ヒューム管)を取り上げ、連続繊維シートによる補強効果を検討した。

連続繊維シート貼付け工法には適用可能な材料が多く存在し、また複合材料として用いるため、材料選定には十分留意する必要がある。本研究で用いた材料はいずれも補修・補強効果を有していたが、それぞれ特徴があり、ひび割れ、変形、破壊性状および耐酸性において選定基準が設定できるものと考えられる。

以下に、本章の範囲内で得られた主要な結果を要約して示す。

- (1) 樹脂の種類より硬化物の力学的性質、耐酸性に差があるが、連続繊維シートを用いた FRP、コンクリート供試体の力学的性質に対して樹脂の違いによる有為差は見られなかった。
- (2) 連続繊維シートの引張剛性の増加は、曲げひび割れ発生荷重、その後の曲げ剛性および剥離ひび割れ進展時の最大引張力を増加させる。樹脂のヤング係数の影響は小さいが、連続繊維シートの引張剛性が大きい場合に曲げひび割れ発生荷重と最大引張力に影響がある。これらの効果はコンクリートのひび割れ状況の影響を受ける。一方、10%硫酸水溶液への6ヶ月間浸漬ではこれらの効果の変化は小さく、FRP層によりコンクリートが酸に対して保護され、FRP層自身が受けた影響も、曲げ性状に顕著な影響を与えるものではなかった。
- (3) ヒューム管の内面補強はひび割れ発生荷重を増加させる。その効果は曲げ試験と同様引張剛性により整理でき、管内面にひび割れを有する場合も耐荷性状は健全なものに近くなった。また、FRP層は破断せず、漏水防止効果を有するものと考えられる。一方、外面補強は最大荷重を増加させる。FRP層の破断が最大荷重を決める場合、その効果は破断荷重により整理できる。
- (4) 連続繊維シート貼付け工法は、耐酸環境での補修・補強効果の低下が少なく、下水道コンクリートへの適用が有効であると考えられる。内面補強は、ひび割れ発生荷重の増加に加え、FRP層が破断しなかったため漏水防止効果も期待できる点で既往の防食被覆工法より優れている。外面補強はFRP層の引張強度を有効に利用する手段の一つになる。また、内外面ともに適用することにより、両者の効果が得られた。

謝 辞

本論文は、著者が京都大学大学院工学研究科助手に着任している間に取り組んできた研究を取りまとめたものであります。この間、諸先生方をはじめ大変多くの方々からご指導、ご鞭撻、ご援助を賜りました。

阪神・淡路大震災の前後数年にわたるそれぞれの研究を実施するにあたり、また、本論文を取りまとめるにあたり、終始、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りましたとともに、完成を辛抱強くお待ちいただき、また、公私共にお世話になりました京都大学大学院工学研究科教授・宮川豊章先生に衷心からの謝意を表します。また、本論文を取りまとめるにあたり、大変有益なご教示を賜りました京都大学大学院工学研究科教授・小野紘一先生、ならびに田村武先生に厚くお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科元教授・故藤井學先生には、学生時代より公私共にご指導、ご鞭撻を賜りました。先生のご冥福をお祈りいたしますとともに、本論文の完成を報告いたします。

大阪工業大学工学部教授・小林和夫先生、ならびに助教授・井上晋先生には、学生時代より常に温かいご指導を賜りました。ここに、厚くお礼申し上げます。

本論文に関する研究を実施するにあたりご支援、ご協力をいただきました京都大学・構造材料学分野のメンバー、ならびに卒業生、関係者の多くみなさまに感謝いたします。また、若手コンクリート研究会をはじめ、著者が関係する新素材、早期劣化、震災などに関する種々の研究委員会では、常に有益な討論をさせていただくとともに、国内外における貴重な情報を得ることができました。ここに全てのご芳名を列記することはできませんが、それぞれのみなさまとの知遇を受けたことが著者にとって大変な財産となりましたことを記しまして、心より感謝申し上げます。

最後に、常に陰ながら応援をしてくれている両親をはじめ家族に感謝するとともに、研究期間中に若くしてこの世を去った弟のために、また、これからの人生における最大の伴侶として歩みを共にする婚約者・明子のために、更なる邁進への誓いを記して、本論文の謝辞といたします。

平成 12 年 2 月

服部 篤史